



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

理學碩士 學位論文

수소화물 기상 에피택시법을 이용한 ZnAl_2O_4 spinel 층 상에 GaN 층 성장에 관한 연구

Growth of GaN layer on ZnAl_2O_4 spinel layer by HVPE

指導教授 張 志 豪



2013年 2月

韓國海洋大學校 大學院

應用科學科 半導體物理專攻

劉 陳 燁

本 論文을 劉陳燁의 理學碩士 學位論文으로 認准함

委員長 李 三 寧 (印)

委 員 安 亨 洙 (印)

委 員 張 志 豪 (印)



2013 年 2 月

韓國海洋大學校 大學院

목 차

List of Figures	i
List of Table	iv
Abstract	v

제 1장. 서론

1.1 III족 질화물 반도체

1.1.1 GaN의 특성과 응용	1
1.1.2 GaN 성장의 문제점	3
1.2 자립형 GaN 기판의 중요성	4
1.3 본 논문의 목적	7
참고문헌	10

제 2장. 실험

2.1 성장 단계

2.1.1 Sputter법	13
2.1.2 열증착법	14
2.1.3 Hydride vapor phase epitaxy (HVPE)	15
2.2 측정	
2.2.1 Four point probe (FPP)	17
2.2.2 X-ray diffraction (XRD)	22
2.2.3 Secondary ion mass spectroscopy (SIMS)	25
2.2.4 Transmission electron microscope (TEM)	27
2.2.5 Atomic force microscope (AFM)	28
2.2.6 Photoluminescence (PL)	29
참고문헌	32

제 3장. ZnO 성장조건의 최적화

3.1 서론	34
3.2 실험 내용	34
3.3 ZnO 박막의 특성	
3.3.1 면저항 측정	35
3.3.2 XRD 분석	36
3.3.3 저온 PL 측정	38
3.3.4 표면 관찰	40
3.4 결론	41
참고문헌	42

제 4장. 고상성장법을 이용한 ZnAl_2O_4 형성

4.1 서론	44
4.2 실험 내용	44
4.3 ZnAl_2O_4 의 특성	
4.3.1 XRD 분석	45
4.3.2 SIMS 분석	46
4.4 결론	47
참고문헌	49

제 5장. GaN 성장에 미치는 ZnAl_2O_4 층의 영향

5.1 서론	50
5.2 실험 내용	51
5.3 HVPE GaN의 특성	
5.3.1 표면 형상	51
5.3.2 TEM 측정	52
5.3.3 SIMS 분석	54
5.3.4 저온 PL 측정	55
5.4 결론	56
참고문헌	57

제 6장. 요약 및 결론	59
---------------------	----

Appendix

A. ZnAl_2O_4 의 결정구조 및 물성	60
--	----

B. MBE GaN의 특성	62
----------------------	----

이력서	65
-----------	----

감사의 글	69
-------------	----



List of Figures

Chapter 1

Figure 1.1 Bandgap and lattice constant of various compound semiconductors.

Figure 1.2 Wurtzite GaN.

Figure 1.3 Phase diagram of GaN.

Figure 1.4 (a) Cracks on the separated surface of the GaN film at the edge of the laser irradiating area and (b) separated surface of a GaN film, which was transferred to the silicon film by the LLO process.

Figure 1.5 SEM images of GaN/TiN/GaN boundaries of the samples grown under carrier gas compositions. (a) 100% H_2 , (b) 10% H_2 +90% N_2 , (c) 100% N_2 .

Figure 1.6 (a) Illustration of masking side facets and threading dislocations. (b) SEM image of a substrate showing the SiO_2 masks on the (11-22) facets.

Figure 1.7 Preparation sequence of the freestanding GaN substrate.

Figure 1.8 Depth profiling of low-temperature (77K) micro-PL of the side cut of freestanding GaN.

Chapter 2

Figure 2.1 Schematic illustration of sputter chamber.

Figure 2.2 Schematic illustration of thermal evaporation system.

Figure 2.3 Schematic diagram of HVPE system.

Figure 2.4 Two point probe system. R_p : probe resistance, R_c : contact resistance (between substrate and probe), R_{sp} : spreading resistance, R_s : semiconductor resistance.

Figure 2.5 Collinear 4-point probe.

Figure 2.6 Schematic illustration of ω scan and ω - 2θ scan for symmetrical (002) and asymmetrical (101) diffraction planes of (0001) GaN. K_i : incident wave vector, K_s : scattered wave vector, θ : diffracted angle.

Figure 2.7 Schematic illustration of AFM.

Figure 2.8 Experimental setup of the PL measurement system in this thesis.

Figure 2.9 Radiative recombination processes in a semiconductor. Every transition accompanies an emission of energy as a light with different wavelength.

Chapter 3

Figure 3.1 The growth rate and sheet resistance as a function of O_2 flow rate.

Figure 3.2 FWHM tendency of ZnO (101) ω scan as a function of O_2 flow rate.

Figure 3.3 (a) (002) ω scan, (b) (101) pole figure results of ZnO film at $k=10:0.5$.

Figure 3.4 PL spectra of ZnO films at 12K.

Figure 3.5 AFM images as a function of Ar: O_2 ratio (a) 10:0, (b) 10:0.5, (c) 10:1, (d) 10:2, and (e) 10:4.

Chapter 4

Figure 4.1 X-ray diffraction of Al/ZnO/ Al_2O_3 samples annealed at various (a) temperatures and (b) times.

Figure 4.2 SIMS depth profile of (a) Al deposited (b) annealed at 575°C samples.

Chapter 5

Figure 5.1 AFM images of (a) LT-GaN and (b) 2-step GaN grown on ZnO

layers, (c) LT-GaN and (d) 2-step GaN grown on ZnAl_2O_4 , respectively.

Figure 5.2 Cross-sectional TEM images of LT-GaN. The BF images of (a) (0002) and (b) (11-20) direction of grown on ZnO, (c) (0002) and (d) (11-20) direction of grown on ZnAl_2O_4 as well.

Figure 5.3 SIMS depth profile of LT-GaN on (a) ZnO and (b) ZnAl_2O_4 , respectively.

Figure 5.4 PL spectra of HVPE GaN samples. (a) 2-step GaN samples, and (b) LT-GaN samples.



List of Tables

Table 2.1 The effects of substrate and epilayer parameters upon the rocking curve.

Table 2.2 Primary ion species and their merits.



Growth of GaN layer on ZnAl_2O_4 spinel layer by HVPE

Jinyeop Yoo

Department of Applied science

Graduate School of

Korea Maritime University

Abstract

In this thesis, GaN was grown on ZnAl_2O_4 to protect ZnO which is chemical and thermal unstable in GaN growth conditions. The feasibility of high quality GaN growth was discussed through the XRD investigation grown GaN. The final aim of this study is the obtaining free-standing GaN substrate which is free from the problems such as crack, bending, and complexity. If the high quality free-standing GaN substrate is achieved, the problems such as bending and dislocations can be resolved from the heteroepitaxy that is caused by lattice mismatch and difference of thermal expansion coefficient.

In the chapter 1, the fundamental GaN properties, applications, problems in the GaN heteroepitaxy, importance of free-standing GaN substrate, and purpose of this thesis are introduced. In the chapter 2, the growth steps and principles of measurement are explained. In the chapter 3, the investigation about ZnO growth is treated. The structural properties of ZnO films at optimized conditions are studied. In the chapter 4, the optimization of the solid phase reaction was studied to form ZnAl_2O_4 . In the chapter 5, the effect of ZnAl_2O_4 was confirmed by HVPE GaN growth. The reduction of

Zn out-diffusion was appeared from the measurement results. It shows us the fact that ZnAl_2O_4 spinel layer is helpful for the reduction of zinc and oxygen diffusion into GaN during the HVPE growth. Finally, the results found from this thesis are summarized and concluded in the chapter 6.



제 1장. 서론

1.1 III족 질화물 반도체

1.1.1 GaN의 특성과 응용

최근 저탄소 친환경 에너지에 대한 관심이 높아짐에 따라 태양전지, 고효율 광원 등의 신재생 에너지가 각광받고 있으며, 이를 제작하기 위한 소재로 여러 가지 물질들이 연구되고 있다. 이 중 GaN와 같은 질화물 반도체는 에너지 간격이 1.9 eV (InN)에서 6.2 eV (AlN)까지 광범위하게 조절할 수 있는 넓은 밴드갭 반도체이기 때문에 근자외·가시광 영역에서 동작하는 광소자를 포함한 micro electro mechanical systems (MEMS), monolithic microwave integrated circuit (MMIC), radio frequency (RF) power transistor 등에 응용된다 [1].

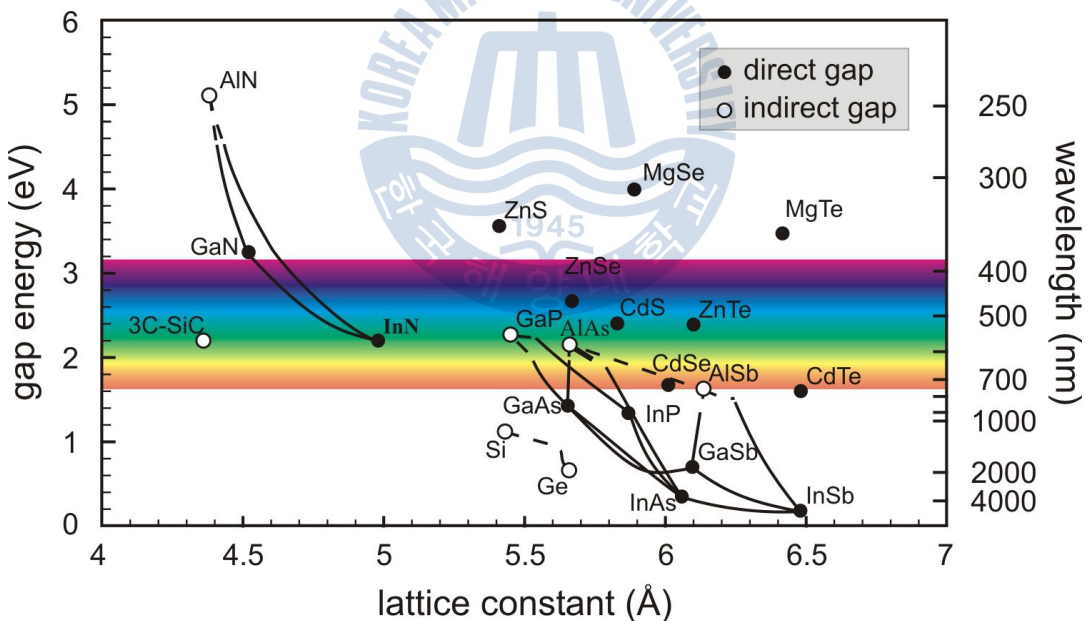


Fig. 1.1 Bandgap and lattice constant of various compound semiconductors [2]

GaN는 안정상인 Wurtzite 구조와 준안정상인 Zincblende 구조를 가지며, 밴드 갭 에너지가 3.4eV이고 격자상수는 $a = 3.189 \text{ \AA}$, $c = 5.185 \text{ \AA}$ 이다 [3,4]. GaN는 캐리어 이동에 있어서 전자의 최대속도가 $2.5 \times 10^7 \text{ cm/sec}$, 포화전자속도가 $1.5 \times 10^7 \text{ cm/sec}$ 로서 Si이나 GaAs보다 우수한 장점을 가지며, 항복전기장의 세기가 Si의 10배가 넘는 $4 \times 10^6 \text{ V/cm}$ 로서 전력소자로의 응용에 중요한 요소를 갖추고 있다. 또한 이동도가 $1000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$ (도핑농도, $10^{17}/\text{cm}^3$) 정도로 고주파·고출력용 소자의 재료로서 주목을 받고 있다 [5].

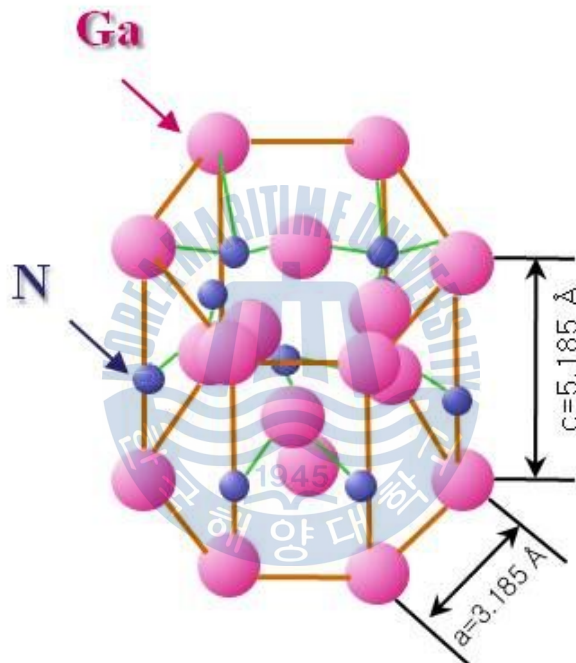


Fig. 1.2 Wurtzite GaN

1.1.2 GaN 성장의 문제점

앞서 열거한 바와 같이, GaN는 상업적 소비와 더불어 중요한 물질이 되었으며, 고효율 광소자를 제작하기 위해 가장 중요한 점은 GaN 기판을 마련하는 것에 있다. 이러한 GaN를 성장하기 위해서는 LPE (Liquid Phase Epitaxy), MOVPE (Metal-organic Vapor Phase Epitaxy), HVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy), MBE (Molecular Beam Epitaxy), Ammonothermal 등의 다양한 방법이 사용되고 있으며, 비교적 좋은 질의 GaN를 빠른 속도로 얻을 수 있는 HVPE 방법이 많이 이용되고 있다 [6-10]. 하지만, GaN는 그림 1.3에 나타난 바와 같이 고온 성장온도에서의 높은 질소 분해압력을 필요로 하기 때문에 단결정성장이 매우 어렵다 [11]. 그로인한 동종기판의 부재로 이종기판에서 주로 성장되는데, 현재 GaN계 질화물 반도체를 성장하기 위한 기판으로는 사파이어 및 SiC 기판이 주로 사용되고 있다. 이종기판을 사용하는 경우, 기판으로 사용되는 물질들과 GaN의 박막 사이에서 strain이나 dislocation과 같은 문제점들이 발생한다 [12-14].



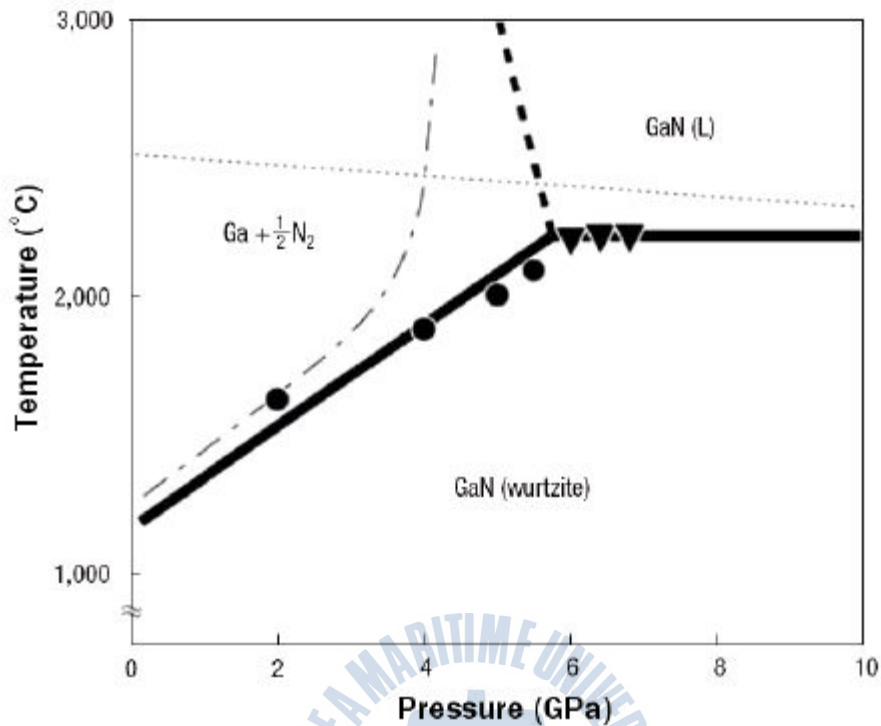


Fig. 1.3 Phase diagram of GaN [11]

1.2 자립형 GaN의 중요성

일반적으로 bulk 상태의 GaN를 얻기는 힘들다. 그림 1.3에서 나타난 바와 같이 질소의 높은 평형증기압 때문에 6 GPa이상의 압력에서 2300°C의 온도에서 반응시킨 후, 온도하강을 통해 그 결정을 얻을 수 있기 때문이다. 그러므로 그동안의 오랜 연구에도 여전히 bulk 상태의 GaN를 만들지 못하고 있는 실정이다 [15,16]. 따라서 GaN를 두껍게 성장하여 기판으로부터 분리하여 얻는 자립형 GaN 기판의 제작이 효율적 대안이 될 수 있다. 기판을 분리하는 방법으로는 앞선 연구에서 다양한 방법을 통해 연구된 바 있다. Laser lift-off (LLO) 기술을 이용하는 분리방법은 Fig. 1.4에 나타난 바와 같이 매우 높은 에너지의 레이저를 사용하기 때문에 그로인한 갈라짐 현상으로 GaN층의 손상이 발생하는 문제

점이 있다 [17-19].

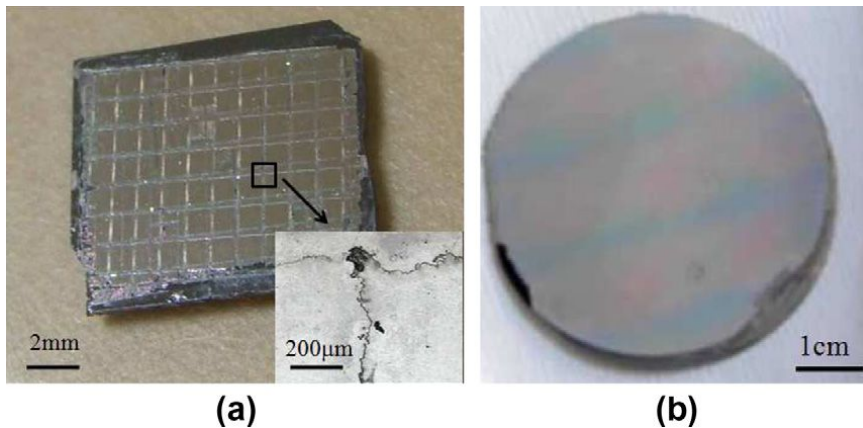


Fig. 1.4 (a) Cracks on the separated surface of the GaN film at the edge of the laser irradiating area and (b) separated surface of a GaN film, which was transferred to the silicon film by the LLO process [18]

이러한 손상을 막기 위해 시도된 것이 Y. Oshima 등 [20]이 연구한 void-assisted separation (VAS) 방법이다. 먼저 GaN template (300nm)을 (0001)면 사파이어 기판 위에 MOVPE를 이용하여 성장한다. 두 번째로 진공챔버 안에서 GaN template 위에 Ti (20 nm)을 증착한다. 세 번째로 Ti 증착된 GaN template을 H_2 (80%)와 NH_3 (20%) 혼합가스 분위기의 $1060^\circ C$ 에서 30분간 열처리를 한 후 마지막으로 GaN 300 μm 를 HVPE를 이용해 성장시킨다. GaN/TiN/GaN 단면 secondary electron microscopy (SEM) 결과가 Fig. 1.5에 나타나 있는데 각각 (a) 100% H_2 , (b) 10% H_2 +90% N_2 , (c) 100% N_2 인 carrier gas 조건에 따라 성장된 사진이다. 100% H_2 의 조건에서는 HVPE-GaN 성장 동안 template GaN의 void가 채워졌으며, 기판으로부터 분리하는 것이 불가능하다. 이에 비해, N_2 가 주입된 조건에서는 void가 커지고, N_2 가 100% 조건일 때 TiN 층 위아래로 그 크기가 확장되면서 분리해낸다.

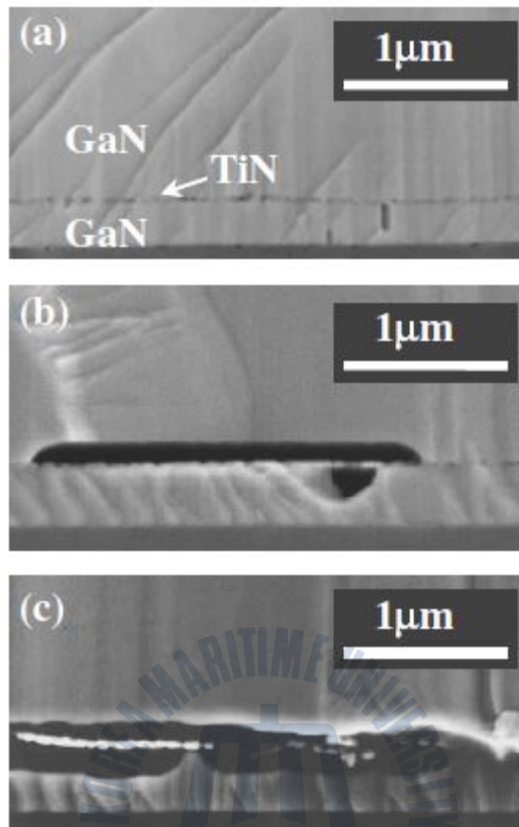


Fig. 1.5 SEM images of GaN/TiN/GaN boundaries of the samples grown under carrier gas compositions. (a) 100% H_2 , (b) 10% H_2 +90% N_2 , (c) 100% N_2

또 다른 방법으로는 Facet-controlled epitaxial lateral overgrowth (FACELO) 방법이 있는데 [21], 첫 단계로 selective area growth (SAG)를 형성하고 SiO_2 마스크를 SAG GaN 층 위에 증착시킨다. 여기에 seed 영역에서 전파되는 dislocation을 휘어지게 하기위해 LP-MOVPE로 seed에서부터 GaN를 10 μm 성장시키고 경사면에서 lateral growth를 진행한다. 후속과정으로 lateral growth rate을 증가하여 void를 형성시키고, 그것으로부터 HVPE를 이용한 GaN성장 시 기판으로부터 자발적인 분리가 일어난다. Fig. 1.5(a)는 FACELO 법을 이용해 성장시킨 GaN의 단면층을 보여준다. side facet의 꼭대기 부분을 제외한 부분은 SiO_2 로 덮이고 GaN가 덮이지 않은 부분에서 MOVPE나 HVPE로 성장된

다. 이와 같이, 앞서 언급한 방법들은 그 제작과정이 매우 복잡한 단점이 존재한다. 그러므로 기존의 기판분리 방법과 달리 새로운 방법은 쉽고 간단하며 양질의 GaN를 얻을 수 있는 것이 요구된다. 본 연구에서는 Chemical etching을 이용해 GaN를 사파이어 기판으로부터 분리해내는 것을 궁극적인 목표로 한다.

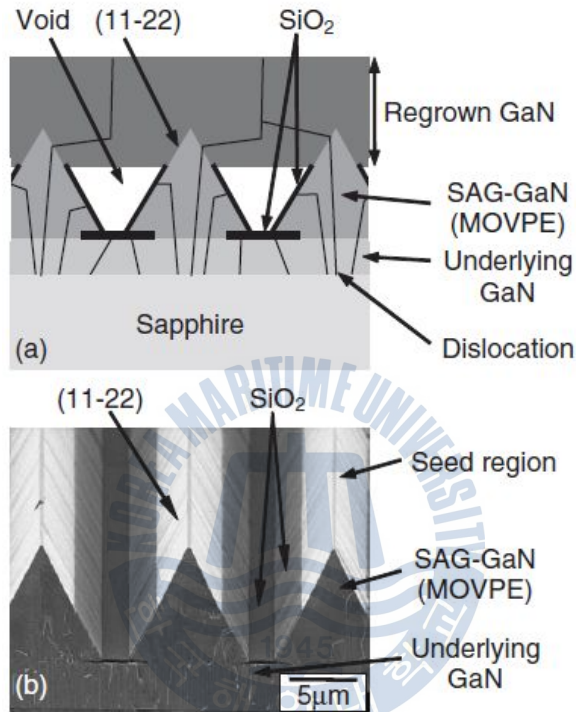


Fig. 1.6 (a) Illustration of masking side facets and threading dislocations. (b) SEM image of a substrate showing the SiO_2 masks on the (11-22) facets

1.3 본 논문의 목적

ZnO는 GaN와 결정구조가 같으며, 격자상수 차이가 1.8% (c-축)와 0.4% (a-축)로 매우 적은 편이다 [22,23]. 또한 화학적으로 쉽게 분해시킬 수 있다 [24-27]. 그러므로 GaN를 성장시키는데 ZnO가 가장 적합한 후보재료라 할 수 있다. ZnO 층 위에 GaN를 성장시키는 연구는 이미 많이 진행되어 왔다. 그러나 HVPE를 이용한 성장에서는 열악한 GaN의 성장환경 조건에서 Fig. 1.4와 같이

H₂나 HCl에 의해 ZnO의 에칭이 먼저 일어나고, 계면에서의 확산으로 인해 GaN 층의 결정성이 저하되는 결과가 보고되어 있다 [28]. Fig. 1.4에 나타난바와 같이 (a) 사파이어에 MBE를 이용하여 ZnO와 GaN를 성장시킨 후, (b) HVPE를 이용해 GaN를 성장시키고 ZnO층을 에칭해낸다. (c) 분리된 GaN 층에 (d) GaN를 고온성장하여 자립형 GaN 기판을 제작하였다.

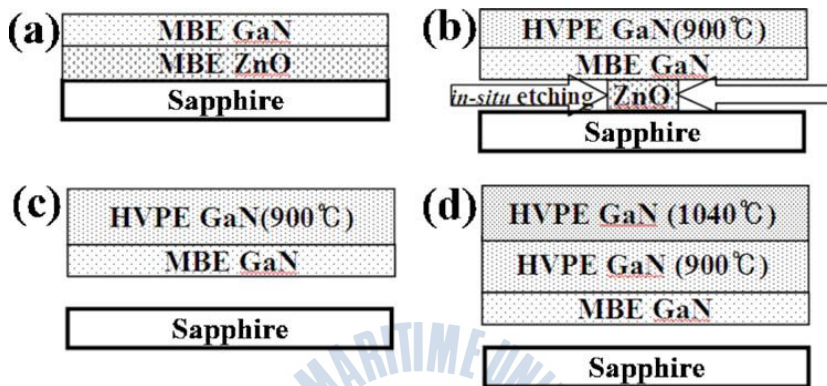


Fig. 1.7 Preparation sequence of the freestanding GaN substrate [27]

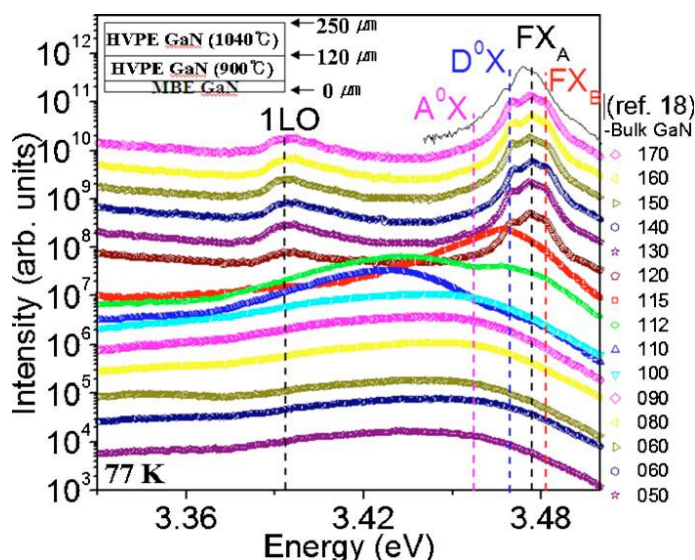


Fig. 1.8 Depth profiling of low-temperature (77K) micro-PL of the side cut of freestanding GaN [27]

PL 측정 결과, 표면 쪽에서 (120 ~ 170 μm) 나타난 스펙트럼에서는 3.4679 eV에서의 D^0X 와 3.4738 eV에서의 FX_A , 3.4783 eV에서의 FX_B peak이 관찰되었다. 반면, ZnO와 GaN의 계면에서 나타나는 PL 스펙트럼은 Zn의 확산으로 인해 Zn acceptor로 작용하여 여기가 일어나고 3.453 eV 부근에서 broad peak을 보여준다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 ZnO 층 위에 $ZnAl_2O_4$ 를 형성하여 GaN 성장시 에칭되는 ZnO를 보호하여 GaN층으로의 확산을 방지하고 양질의 자립형 기판 제작을 위한 GaN 후막을 성장시키고자 하였다.

참고문헌

- [1] S. Nakamura, T. Mukai and M. Senoh, Jpn, J. Appl. Phys., 30 (1991) L1998.
- [2] H. Ibach and H. Lueth, Solid state physics, Springer Verlag (2003).
- [3] H. P. Maruska and J. J. Tietjen, appl. Phys. Lett. 15 (1969) 327.
- [4] Bougrov V., Levinshtein M. E., Rumyantsev S. L., Zubrilov A., in Properties of Advanced Semiconductor Materials GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe. Eds. Levinshtein M.E., Rumyantsev S.L., Shur M.S., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001, 1 - 30.
- [5] S. C. Binari, L. B. Rowland, G. Kelner, W. Kruppa, H. B. dietrich, K. Doverspike D. K. Gaskill, Int. Sym. Compound Semiconductors, ed. H. Goronkin (IOP Publishing), Bristol, (1995) 459.
- [6] M. Morishita, F. Kawamura, M. Kawahara, M. Yoshimura, Y. Mori, and T. Sasaki, J. Cryst. Growth, 270 (2004) 402.
- [7] D. J. Rogers, F. H. Teherani, A. Ougazzaden, S. Gautier, L. Divay, A. Lusson, O. Durand, F. Wyczisk, G. Garry, T. Monteiro, M. R. Correia, M. Peres, A. Neves, D. McGrouther, J. N. Chapman, and M. Razeghi, Appl. Phys. Lett. 91 (2007) 071120.
- [8] C. L. Chao, C.H. Chiu, Y. J. Lee, H. C. Kuo, P. C. Liu, J. D. Tsay, and S. J. Cheng, Appl. Phys. Lett., 95(2009) 051905.
- [9] F. Hamdani, A. Botchkarev, W. Kim, H. Morkoc, M. Yeadon, J. M. Gibson, S. -C. Y. Tsen, D. J. Smith, D. C. Reynolds, D. C. Look, K. Evans, C. W. Litton, W. C. Mitchel, and P. Hemenger, Appl. Phys. Lett., 70 (1997) 467.
- [10] S. F. Chichibu, T. Onuma, T. Hashimoto, K. Fujito, F. Wu, J. S. Speck, and S. Nakamura, Appl. Phys. Lett., 91 (2007) 251911.
- [11] H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki and T. Yoyoda, Appl. Phys. Lett. 48 (1986) 353.

- [12] B. N. Sverdlov, G. A. Martin, H. Morkoc, and D. J. Smith, Appl. Phys. Lett. 67 (1995) 2063.
- [13] D. J. Smith, D. Chandrasckhar, B. Sverdlov, A. Botchkarev, A. Salvador, and H. Morkoc, Appl. Phys. Lett., 67 (1995) 1830.
- [14] S. D. Lester, F. A. Ponce, M. G. Craford, and D. A. Steigerwald, Appl. Phys. Lett., 66 (1995) 1249.
- [15] M. Aoki, H. Yamane, M. Shimada, S. Sarayama, H. Iwata and F. J. Disalvo, J. Cryst. Growth, 266 (2004) 461.
- [16] B. Wang, M. J. Callaha, K. D. Rakes, L. O. Bouthillette, S. Q. Wang, D. F. Bliss and J. W. Kolis, J. Cryst. Growth, 287 (2006) 376.
- [17] Y. S. Jang, W. R. Kim, D. H. Jang, J. I. Shim, and D. S. Shin, J. Appl. Phys., 107 (2010) 113537.
- [18] M. Q. Wang, Y. Wang, Y. J. Sun, G. Y. Zhnag, Y. Z. Tong, and H. L. Duan, Int. J. Solids Struct., 49 (2012) 1701.
- [19] P. R. Tavernier and D. R. Klarke, J. Appl. Phys., 89 (2001) 1527.
- [20] S. Bohyama, H. Miyake, K. Hiramatsu, Y. Tsuchida, and T. Maeda, Jpn. J. Appl. Phys., 44 (2005) L24.
- [21] Y. Oshima, T. Eri, M. Shibata, H. Sunakawa, K. Kobayashi, T. Ichihashi, and A. Usui, Jpn. J. Appl. Phys., 42 (2003) L1.
- [22] Ü. Özgür, Y. I. Alivov, C. Liu, A. Teke, M. A. Reshchikov, S. Doğan, V. Avrutin, S. J. Cho, and H. Morkog, J. Appl. Phys., 98 (2005) 041301.
- [23] A. Kobayashi, S. Kawano, Y. Kawaguchi, J. Ohta, and H. Fujioka, Appl. Phys. Lett., 90 (2007) 041908.
- [24] H. Maki, T. Ikoma, I. Sakaguchi, N. Ohashi, H. Haneda, J. Tanaka, and N. Ichinose, Thin Solid Films, 411 (2002) 91.
- [25] Y. Li, G. S. Tompa, S. Liang, C. Gorla, Y. Lu, and J. Doyle, J. Vac. Sci. Technol. A, 15 (1997) 1063.
- [26] J. Sun, J. Bian, H. Liang, J. Zhao, L. Hu, Z. Zhao, W. Liu, and G. Du, Applied Surface Science, 253 (2007) 5161.
- [27] J. G. E. Gardeniers, Z. M. Rittersma, and G. J. Burger, J. Appl. Phys., 83

(1998) 7844.

- [28] S. W. Lee, T. Minegishi, W. H. Lee, H. Goto, H. J. Lee, S. H. Lee, H. J. Lee, J. S. Ha, T. Goto, T. Hanada, M. W. Cho, and T. Yao, Appl. Phys. Lett., 90 (2007) 061907.



제 2장. 실험

2.1 성장 단계

2.1.1 스퍼터법

스퍼터 방식은 본 연구에서 기관 분리를 위한 화학적 에칭 단계에 필요한 ZnO 희생층을 성장하는데 사용되는 방법이다. 스퍼터 법은 대면적에 비교적 쉬운 방법으로 양호한 품질의 ZnO 박막을 형성할 수 있다. 기체의 압력이 $10^0 \sim 10^{-3}$ Pa 정도의 진공내의 두 개의 전극 간에 고전압을 걸어주었을 때, 양전극에 생기는 글로우 방전을 이용하여 ion을 형성하고 이를 전장으로 가속하여 고체 표면에 충돌시킨다. 이때 고체 내부의 원자와 분자들은 운동량 교환을 통해 표면 밖으로 튀어나오게 되며, 전자와 기체분자와의 비탄성 충돌에 의해 여기상태에 있는 중성 원자도 존재한다. 전자의 질량은 이온의 질량보다 훨씬 작기 때문에, 플라즈마 중에서의 전자의 이동도는 이온의 이동도보다 크다. 따라서 플라즈마에 밖에서 자장이 가해지면 전자만이 가속되고 이온은 그 만큼 가속되지 않는다. 가속된 양이온이 고체표면에 충돌하면 중성원자 배출, 후방산란, X선 방출, 광자 발생, 이차 전자 방출, 그리고 target 표면에서 기체원자의 탈착 등이 발생하며, target에서는 비정질화, 이온침투, 화합물 형성, cascade 발생, 국부적 가열, 점결함이 생성된다 [1].

플라즈마를 유지하는데 가장 중요한 역할을 하는 것은 이차 전자인데, 플라즈마 내에서 이차 전자는 추가적인 이온화를 일으키고 가속된 이온이 가지고 있는 에너지와 운동량의 전이, 충돌로 인한 가열, 가열에 의한 어닐링, 이온이나 원자의 확산 등에 sputtering 반응이 영향을 받는다[1,2].

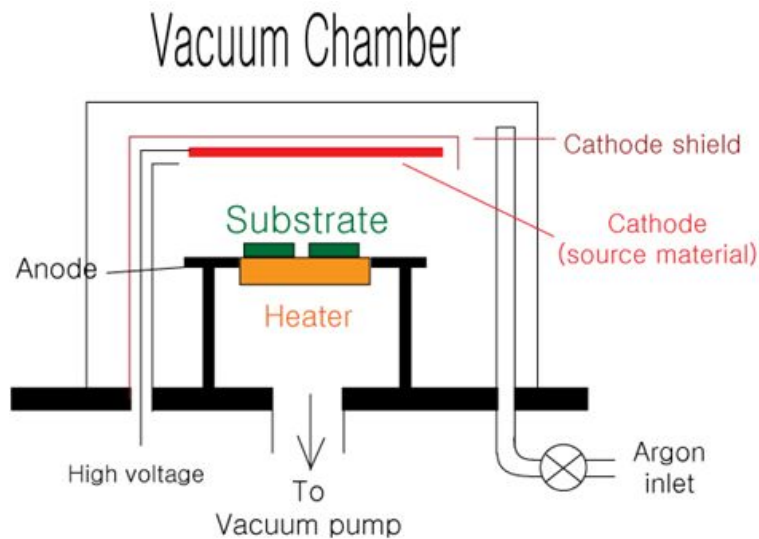


Fig. 2.1 Schematic illustration of sputter chamber

2.1.2 열 증착법

본 연구에서는 ZnAl_2O_4 의 생성을 위해 스퍼터로 성장한 ZnO 층 위에 열 증착법을 이용해서 Al 층을 성막하였다. 열 증착법은 금속재료를 증착시키기 위해 고진공 ($5 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-7}$ Torr) 에서 보트를 가열하여 보트위에 놓인 금속을 녹여 증발시키는 것이다. 이때 증발된 금속은 웨이퍼 표면에 닿아 응축되는 방식으로 증착이 이루어진다. Fig. 2.2에서와 같이 금속은 저항 가열 소스 홀더(보트)위에 놓이게 되는데, 챔버 내에 진공을 만들고 원하는 진공상태에서 보트에 전원을 공급하여 금속을 증발시킨다 [3].

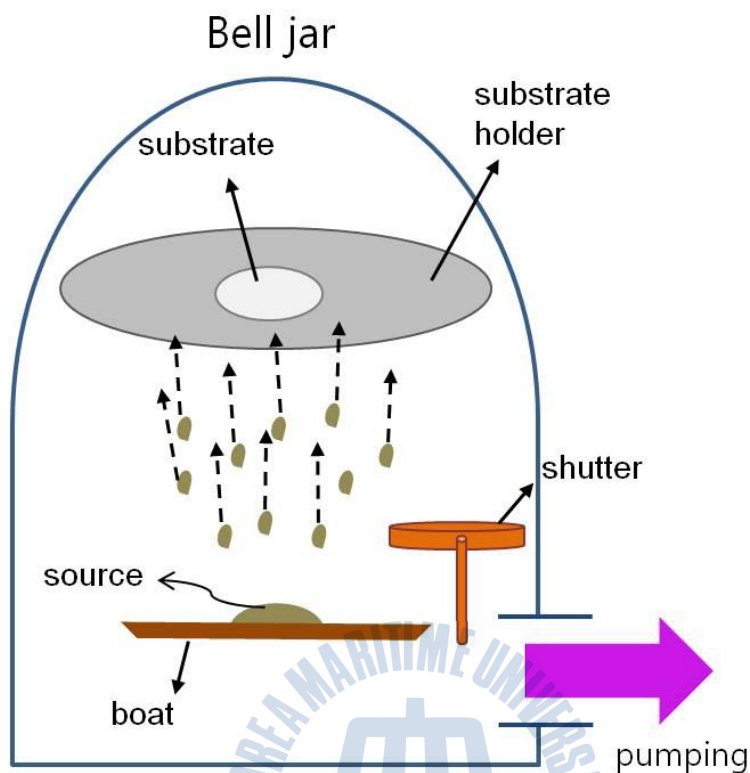


Fig. 2.2 Schematic illustration of thermal evaporation system

2.1.3 Hydride vapor phase epitaxy (HVPE)

HVPE는 열역학적 평형에 가까운 상태에서 일어나는 성장법으로 GaN를 성장하는데 탁월한 장비이다. 그러므로 최근까지 많은 연구가 이루어져오고 있으며, 선택적 성장과 같은 다양한 방법이 성장에 적용되고 있다. 또한 가장 큰 이점은 GaN 기판이나 template을 제작하는데 적합한 장점 (고품질, 빠른 성장률) 을 가지고 있어 더욱 주목받아 왔다.

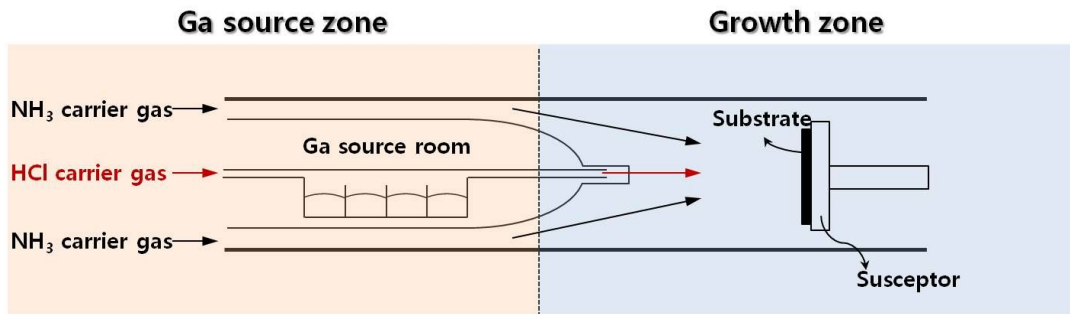
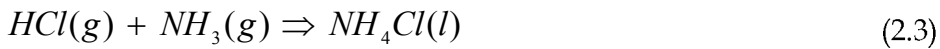
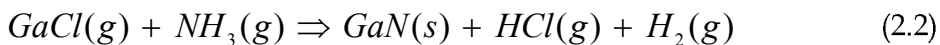
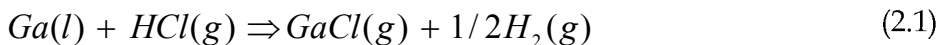


Fig. 2.3 Schematic diagram of HVPE system

HVPE는 대기압에서 열·화학적 반응을 하는 성장방식이다. 그림 2.3에 나타난 바와 같이 HCl과 NH₃는 관을 따라 이동하면서 반응물질을 생성하고, 최종적인 성장 영역에서 HCl, NH₄Cl, H₂의 부산물들과 함께 우리가 얻고자하는 GaN가 형성된다. 소스 영역과 성장 영역에서의 온도조절은 개별적으로 조절 가능하다. 실험에 사용된 장비는 6개의 석영으로 된 퍼니스를 포함하고 있으며, 소스와 기판의 온도, 반응물의 전달이 최적화 되도록 설계되었다. HCl과 H₂ 캐리어 가스는 Ga 소스가 있는 공간으로 관을 따라 이동되며, 그 공간의 온도와 성장영역의 온도는 저온 850°C와 고온 1020°C에서 진행되었다 [4].

반응의 결과물으로써 성장영역에서 회전하던 기판 위에는 GaN가 남게 된다. 에피택시 성장이 대기압에서 유도되었고 반응로 내부에서의 반응식은 다음과 같다.



2.2 측정

2.2.1 Four point probe (FPP)

Four-point probe 측정법의 종류에는 2개의 단자를 사용한 Two-point probe (TPP)와 4개의 단자를 사용한 FPP가 있다. TPP 방법은 두개의 probe만 조작하면 되므로 사용하기가 쉬운 반면 측정된 데이터의 해석이 다소 어렵다는 단점이 있다 [5]. Fig. 2.4와 같이 두 개의 단자 (probe) 를 이용한 TPP를 보면 두 개의 probe 양단간에 전압 V 를 가하면 전류 I 가 흐르게 되는데, 이때 전압과 전류의 비로 표시되는 probe 양 단간의 총 저항은 식(2.4)와 같이 표현되고 불순물의 농도는 도핑영역의 저항 R_s 를 이용하여 계산할 수 있다. 그러나 TPP인 경우 Mechanical probe contact 저항 R_c 를 정확하게 계산할 수 없기 때문에 R_c 와 R_{sp} , R_s 가 정확하게 분리될 수 없는 단점이 있다. 또한 R_{sh} 가 R_s 보다 매우 커서 구하고자 하는 R_s 의 값을 정확하게 추출하기가 매우 어려운 문제점이 있다. 이러한 단점을 보완한 것이 FPP이다.

$$R_T = \frac{V}{I} = 2R_p + 2R_c + 2R_{sp} + R_s \quad (2.4)$$

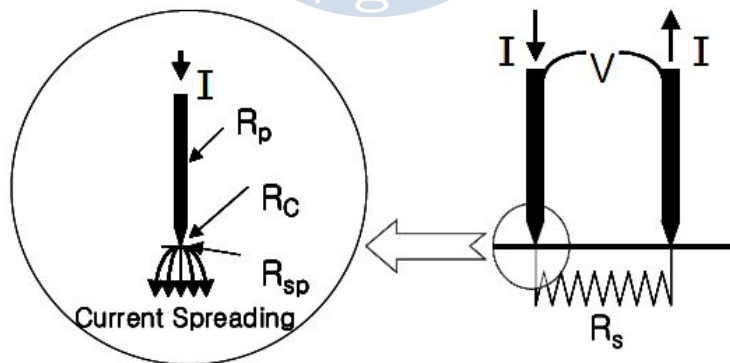


Fig. 2.4 Two-point probe system. R_p : probe resistance, R_c : contact resistance (between substrate and probe), R_{sp} : spreading resistance, R_s : semiconductor resistance

FPP 방법은 반도체의 비저항, 특히 절연체위에 형성된 금속박막의 저항율을 측정하는데 있어서 가장 널리 사용되는 방법으로 특별한 calibration 절차가 필요 없는 측정이 매우 간단하고 정확한 방법이다. FPP의 기본적인 개념은 Probe 단자 1과 4에 일정한 전류를 흘려주고 Probe 단자 2와 3사이의 전압을 측정하여 전압과 전류사이의 비율을 이용하여 저항율을 계산한다 [6].

FPP의 저항율 (resistivity) 에 관한 수식을 유도하기 위해 전류 I 가 probe 1으로 들어가서 probe 4로 나온다고 가정하고, 아주 큰 도체의 중심부에 전류가 흐를 때 전류가 흐르는 지점을 기준으로 일정거리 떨어진 곳의 전압 V 를 구하면 식(2.5)와 같이 표현된다. 여기서 도체의 저항율 r 은 전류가 흐르는 지점과의 거리, I 는 흐르는 전류값을 나타낸다.

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (2.5)$$

전류가 흘러 들어가는 것을 (+)라고 한다면 전류가 흘러 나오는 경우 전압 V 는 식(2.6)과 같이 표현된다. 이제 Probe 1에서 흘러 들어가는 전류와 Probe 4에서 흘러나오는 전류를 모두 고려하여 임의의 지점에서의 전압식을 계산하면 식(2.7)과 같이 표현되며, 식(2.7)에서 r_1 은 probe 1과의 거리, r_2 는 probe 4와의 거리를 나타낸다.

$$V = -\frac{\rho I}{2\pi r} \quad (2.6)$$

$$V_0 = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_4} \right) \quad (2.7)$$

Fig. 2.6에서 두 번째와 세 번째 probe에서의 potential을 식(2.4)를 이용하여 표현내면 각각 식(2.8)과 식(2.9)와 같이 표현된다.

$$V_2 = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_2 + s_3} \right) \quad (2.8)$$

$$V_3 = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{s_1 + s_2} - \frac{1}{s_3} \right) \quad (2.9)$$

식(2.8)과 식(2.9)를 이용하여 Probe 2와 Probe 3과의 전압차를 구하면 식(2.10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = V_2 - V_3 = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_2 + s_3} - \frac{1}{s_1 + s_2} + \frac{1}{s_3} \right) \quad (2.10)$$

저항율은 식(2.11)과 같이 표현되고 각 probe 공간이 같다고 가정하면 식(2.12)와 같이 표현된다.

$$\rho = \frac{\frac{2\pi V}{I}}{\frac{1}{s_1} - \frac{1}{(s_1 + s_2)} - \frac{1}{(s_1 + s_2)} + \frac{1}{s_3}} \quad (2.11)$$

$$\rho = 2\pi \left(\frac{V}{I} \right) \quad (2.12)$$

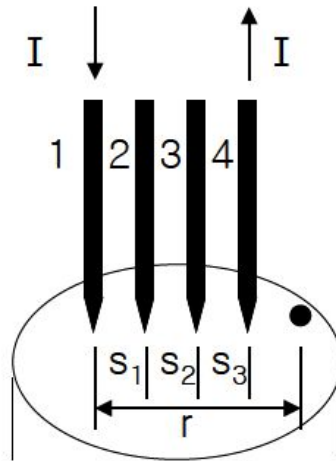


Fig. 2.5 Collinear 4-point probe.

식(2.12)에서 주의할 것은 앞서서도 언급했듯이 식(2.5)는 아주 큰 도체의 중심부에 전류가 흐르는 것을 가정했는데 Fig. 2.5와 같이 실제 반도체 구조는 두께가 얇고 전류가 위에서 밑으로 흐르는 것이 아니라 옆으로 흐르므로 이 부분을 보상해야 정확한 저항율을 계산할 수 있다. 따라서 식(2.12)에 이상적인 경우에서 벗어나는 만큼의 보정 요소 (Correction factor) 를 고려하면 최종적인 저항율은 식(2.13)과 같이 표현된다. 따라서 FPP를 이용하여 probe 간의 거리 s 와 probe 1과 4사이에 가한 전류 I , 그리고 Probe 2와 3사이의 전압 V , 마지막으로 보정 요소 F 를 구하면 반도체의 저항율을 정확하게 얻을 수 있다 [7]. 식(2.13)은 반도체에만 성립되는 것이 아니라 어떠한 도체에서도 적용될 수 있어서 웨이퍼 위에 형성된 얇은 도체의 저항율을 구하는 것에 더 많이 사용되고 있다.

$$\rho = 2\pi s F \left(\frac{V}{I} \right) \quad (2.13)$$

앞에서 언급했듯이 보정 요소를 정확히 보상해 주어야 정확한 저항율을 얻을 수 있다. 보정 요소를 계산하는 방법은 여러 가지가 있으나 여기서는 probe 간격 s 가 일정하고 일렬로 정렬한 collinear probe인 경우에 대해서만 고려하였다.

보정 요소는 일반적으로 샘플의 두께, 샘플 사이즈, 샘플의 기하학적 구조를 고려한다. 측정하고자하는 물질의 아래에 부도체인 경우와 도체인 경우를 고려해서 그에 해당하는 두께보상을 적용한다. 샘플 두께 보정 요소만 고려한 비저항은 식(2.14)와 같이 표현되며 Probe tip간의 거리에 의존하지 않는다. 식(2.14)에서 보면 샘플의 두께 t 를 알아야 저항율을 계산할 수 있다. FPP에서 얻을 수 있는 값은 전류 값과 전압 값뿐이므로 식(2.14)을 변형하여 대부분 식(2.15)와 같이 나타내는데, 이때 왼쪽 항을 면저항 (Sheet resistance, Ohm/square)이라 한다. 따라서 FPP에서 얻는 값은 면저항 값이 되며, 면저항 값에 두께를 곱하면 저항율이다 [8].

$$\rho = \frac{\pi}{\ln(2)} \frac{V}{I} = 4.532t \frac{V}{I} \quad (2.14)$$

$$\rho_s = \frac{\rho}{t} = \frac{\pi}{\ln(2)} \frac{V}{I} = 4.532 \frac{V}{I} \quad (2.15)$$

식(2.5)의 전제 조건은 아주 큰 도체로서 식(2.5)가 성립하기 위해서는 sample의 크기 D 가 probe 간격 s 에 비해 40배 이상 커야 한다. 그러나 실제적으로는 Sample의 크기가 작은 경우가 많게 되며 이 경우에는 sample 크기를 고려한 보정 요소를 적용해야 한다. Sample size를 고려한 보정 요소는 식(2.16)과 같으며 Sheet resistance는 식(2.17)과 같이 표현된다.

$$F_2 = \frac{\ln(2)}{\ln(2) + \ln\{[(D/2)^2 + 3]/[(D/s)^2 - 3]\}} \quad (2.16)$$

$$\rho_s = 4.532 \frac{V}{I} F_2 \quad (2.17)$$

최근에는 측정법을 약간 변화시켜 crack의 검출에도 사용하는 경우가 있다 [6,7].

2.2.2 X-ray diffraction (XRD)

고전적인 high resolution XRD (HR-XRD)는 에피택시 성장층의 구조적 특성을 파악하는 비파괴적인 측정법이다. 측정에서 획득한 회절 패턴으로부터 성장층의 균일성과 합성물을 알 수 있고, 결함밀도와 관련된 결정성, strain relaxation을 확인할 수 있다 [9]. 고분해능 XRD 장비는 방출되는 x-ray 빔을 4개의 Ge(220) 결정의 monochromator를 이용하여 빔의 집속도를 높이고 slit으로 크기를 조절하여 시료 표면으로 조사한다. 시료의 표면에 회절되어 나오는 빔을 검출하여 분석이 이루어지며, slit은 0.02 mm 단위로 10 nm까지 다양하게 변화가능하다. 회절된 빔은 고분해능에 사용되는 double arm 장치에 의해 검출된다. 하나의 arm은 rocking curve 장치이고 나머지 하나는 triple axis 모드에 변환하는 신호를 분석계에 보내주는 역할을 한다. Table 2.1에는 rocking curve 측정시 영향을 주는 중요한 변수에 대해 요약해 놓았다[10].

Table 2.1. The effects of substrate and epilayer parameters upon the rocking curve

Material parameter	Effect on rocking curve	Distinguishing features
Mismatch	Splitting of layer and substrate peak	Invariant with sample rotation
Misorientation	Splitting of layer and substrate peak	Changes sign with sample rotation
Dislocation content	Broadening peak	Broadening invariant with beam size No shift of peak with beam position on sample.
Mosaic spread	Broadening peak	Broadening may increase with beam size, up to mosaic cell size
Curvature	Broadening peak	Broadening increases linearly with beam size Peak shifts systematically with beam position on sample
Relaxation	Changes splitting	Different effect on symmetrical and asymmetrical reflection
Thickness	Affects intensity of Peak	Integrated intensity increases with layer thickness, up to a limit
Inhomogeneity	Effects vary with position on sample	Individual characteristics may be mapped

Fig. 2.7에 나타난 것처럼 대칭면에 대한 ω 스캔과 ω - 2θ 스캔은 각각 박막의 결함밀도와 표면 내부의 회절면간 거리의 분포를 관찰하기 위함이고, (101) 면에 대한 ω 스캔과 ω - 2θ 스캔은 동일한 영향을 각각 표면에 비대칭한 방향으로 관찰하기 위함이다.

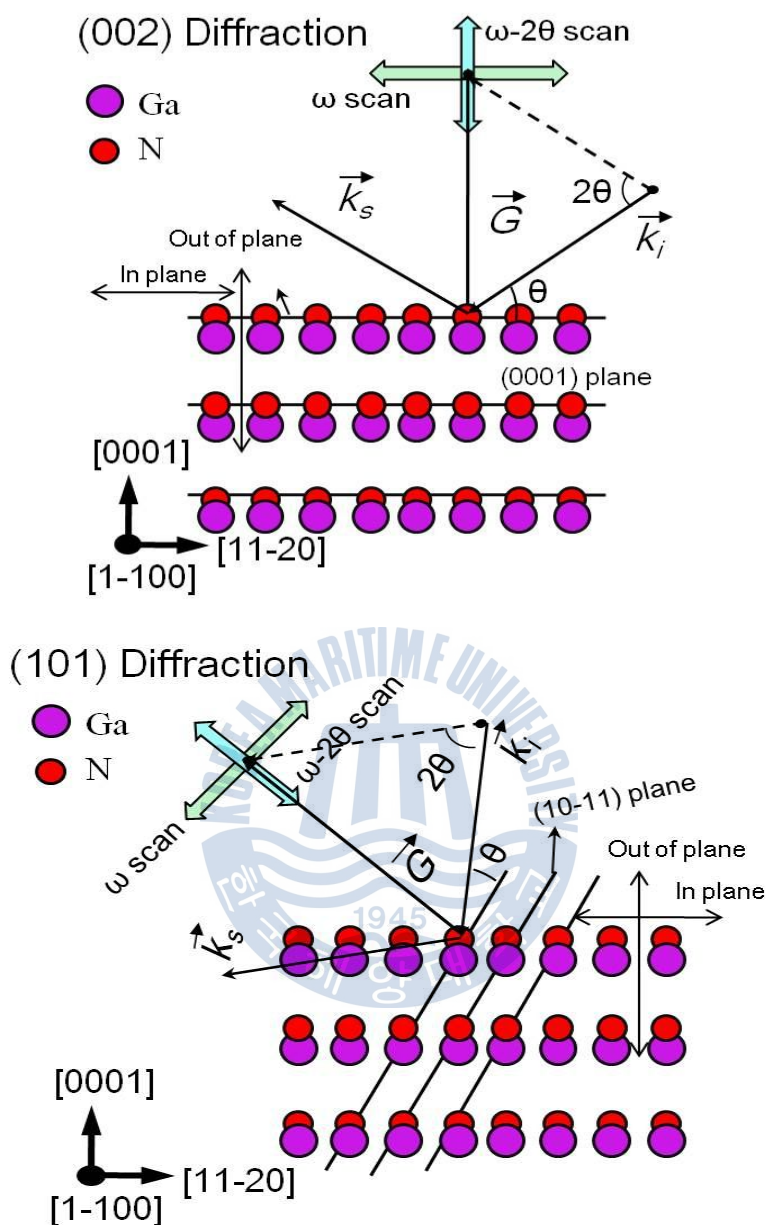


Fig. 2.6 Schematic illustration of ω scan and $\omega-2\theta$ scan for symmetrical(002) and asymmetrical(101) diffraction planes of (0001) GaN. K_i : incident wave vector, K_s : scattered wave vector, θ : diffracted angle

2.2.3 Secondary ion mass spectroscopy (SIMS)

SIMS 측정은 집속시킨 1차 이온이 시료표면에서 산란되어, 수집한 2차 이온을 분석하는 방법으로 고체표면이나 박막의 성분을 분석하기 위해서 사용된다. 2차 이온의 질량/전하 비율은 표면에서 1 ~ 2 nm 깊이의 물질, 분자 구성요소를 결정하기 위해 질량분석기를 이용해 측정된다. 서로 다른 물질들 사이에 이온화 정도가 큰 차이를 보이기 때문에 SIMS 측정은 일반적으로 질적인 관점에서 고려된다[11]. SIMS의 종류로는 크게 시료 표면의 단층 파괴를 최소화하여 구성성분을 분석할 수 있는 static SIMS와 시료 표면에서부터 침투하여 깊이에 따른 원소의 분포 및 농도를 알 수 있는 dynamic SIMS 두 가지로 나눌 수 있다 [12].

시료를 분석하기 위한 1차 빔을 선택하기 위해 고려해야 하는 요인들로 2차 이온 발생률, 검출 한계, 깊이 분해능, 상대 감도 인자 (relative sensitivity factors, RSF) 가 있다. 1차 이온의 종류와 그 이온이 가지는 장점을 table 2.2에 정리하였다 [11,14]. 입사 에너지는 깊이 분해능, 2차 이온 발생률, 산란 수득률에 영향을 주며, 측정에 사용되는 에너지영역에서는 입사된 에너지가 증가 할수록 산란 수득률이 증가한다. 시료에 걸리는 전압이 자기 영역 (magnetic sector)에 영향을 주기 때문에 일반적으로 4 ~ 6 keV를 사용한다 [11]. 1차 이온의 각도는 산란 수득률, 2차 이온 수득률, 깊이 분해능에 영향을 준다. 낮은 각으로 입사하는 경우는 높은 2차 이온 수득률에 좋고, 높은 각으로 입사하는 경우는 높은 투과율과 깊이 분해능을 얻을 수 있다. 깊이 분석에서는 패인구멍의 영향 때문에 수평한 면에서의 검출뿐 아니라 수직한 부분의 검출도 포함하므로 2차 이온 검출에 오차가 발생한다.

Table 2.2. Primary ion species and their merits [11,14]

1차이온의 종류	장점
O_2^+ , Cs^+	2차 양, 음이온의 발생률이 좋음
Ar^+ , Xe^+	Polymer를 분석할 때 2차 분자 이온의 발생률이 좋음
O^-	Charging 되는 샘플의 측정에 좋음
Ga^+	수평분해능이 좋음



2.2.4 Transmission electron microscope (TEM)

투과전자 현미경은 고에너지를 가진 전자가 얇은 시편에 입사되어 투과된 전자의 위상과 강도에 의하여 영상이 형성되는 현상을 이용하는 방법으로, 광원의 파장이 10^{-4} 이하로 작기 때문에 분해능이 우수하여 시편의 미세조직을 고배율로 확대하여 관찰 가능하다. 광원으로 쓰이는 전자는 음전하를 띠고 있어서 전자파나 X-선에 비하여 물질과 아주 민감하게 반응하여 강하게 회절되므로, 국부적인 원자배열의 변형까지도 분석가능하다 [15,16]. TEM 기기 구성원은 크게 네 가지로 나뉘어진다. 원통부는 전자총 (electron gun) 부분, 전자빔을 모으는 condensing system, 영상을 만들고 확대시키는 영상시스템과 투영시스템, 그리고 관찰 및 기록용 필름이 들어있는 관찰 및 기록 시스템으로 나뉘어진다.

대물렌즈에 산란전자가 통과하여 1차 중간 영상과 회절도형이 형성되고, 투영렌즈의 초점거리에 형성된 영상을 이용하여 대물렌즈를 조절함으로써 시편영상의 초점이 맞추어진다. 고분해능의 영상을 얻기 위해 구면수차 감소가 중요한데, 그러기 위해 렌즈가 아주 짧은 초점거리를 유지해야한다. 대물렌즈 조리개를 사용함으로써 탄성산란 전자들이 영상형성에 기여하지 못하게 제한하기 때문에 영상 컨트라스트가 형성된다. 따라서, 대물렌즈 설계와 수차는 현미경의 성능 결정에 영향을 준다[17].

투과전자 현미경은 나노영역의 분해능과 함께 복합분석이 가능한 것이 가장 큰 장점이다. 현재 200 kV 급 분석 투과전자 현미경은 고분해능 (High Resolution, Atomic Resolution) 영상관찰법이 사용되며 영상의 분해능은 약 0.2 nm수준에 이른다 [17,18]. 또한 나노영역의 회절분석이나 분광분석을 위하여 전자탐침으로 분석영역을 선택하게 되며 이 경우 집속된 전자탐침의 크기는 약 0.1 nm까지 줄일 수 있다 [19,20]. 또한 분광분석도 X-선과 전자선의 에너지를 분석하여 원소의 종류와 양을 구할 수 있다. 이외에도 전기장이나 자기장의 분포, 자성재료의 자구관찰 등의 다양한 기능들을 가지고 있다.

2.2.5 Atomic force microscope (AFM)

AFM은 scanning probe microscopy (SPM) 의 한 종류로서 물질의 표면특성을 원자단위까지 측정할 수 있는 현미경이다. 원자현미경의 수직방향의 분해능은 수평 방향보다 더욱 좋아서 원자지름의 수십 분의 일 (0.01 nm) 까지도 측정해 낼 수 있다. AFM에서는 텅스텐으로 만든 바늘 대신에 Micro-machine으로 제조된 캔틸레버 (Cantilever) 를 쓴다. 캔틸레버는 길이가 100 μm , 폭 10 μm , 두께 1 μm 로서 아주 작아 미세한 힘에 의해서도 아래위로 쉽게 휘어지도록 만들어졌다. 또한 캔틸레버 끝 부분에는 뽕족한 바늘이 달려 있으며, 이 바늘의 끝은 STM의 탐침처럼 원자 몇 개 정도의 크기로 매우 첨예하다. 이 탐침을 시료 표면에 접근시키면 탐침 끝의 원자와 시료표면의 원자 사이에 서로의 간격에 따라 끌어당기거나 (인력) 밀어내는 힘 (척력)이 작용한다. AFM의 측정모드에는 Contact mode와 Noncontact mode가 있다 [21,22].

Contact mode 에서는 척력을 사용하는데 그 힘의 크기는 1~10 nN 정도로 아주 미세하지만 캔틸레버 역시 아주 민감하므로 그 힘에 의해 휘어지게 된다. 이 캔틸레버가 아래위로 휘는 것을 측정하기 위하여 레이저 광선을 캔틸레버에 비추고 캔틸레버 윗면에서 반사된 광선의 각도를 포토다이오드 (Photodiode) 를 사용하여 측정한다. 이렇게 하면 바늘 끝이 0.01 nm 정도로 미세하게 움직이는 것까지 측정해낼 수 있다. 바늘 끝의 움직임을 구동기에 반응 (feedback)을 주어 AFM의 캔틸레버가 일정하게 휘도록 유지시키면 탐침 끝과 시료사이의 간격도 일정해지므로 시료의 형상을 측정해낼 수 있다. Non-contact mode에서는 원자사이의 인력을 사용하는데, 그 힘의 크기는 0.1- 0.01 nN 정도로 시료에 인가하는 힘이 contact mode에 비해 훨씬 작아 손상되기 쉬운 부드러운 시료를 측정하는데 적합하다. 원자간 인력의 크기가 너무 작아 캔틸레버가 휘는 각도를 직접 잴 수가 없기 때문에 non-contact mode에서는 캔틸레버를 고유진동수 부근에서 기계적으로 진동시킨다. 시료표면에 다가가면 원자 간의 인력에 의해 고유진동수가 변하게 되어 진폭과 위상에 변화가 생기고 그 변화를 lock-in amplifier로 측정한다. 원자 간에 상호 작용하는 힘은 시료의 전기적 성질에 관계없이 항상 존재하므로 도체나 부도체 모두를 높은 분해능으로 관찰 할 수 있다.

Fig. 2.8에 나타난 AFM의 구조에 대해 살펴보면, 캔틸레버라고 불리는 작은 막대 끝부분에 달려있는 탐침과 시료표면의 원자 사이의 힘에 의해 캔틸레버가 아래위로 휘게 되는데, 이때 레이저 광선이 캔틸레버 윗면에서 반사되는 각도를 포토다이오드로 측정함으로써 표면의 굴곡을 알아낸다.

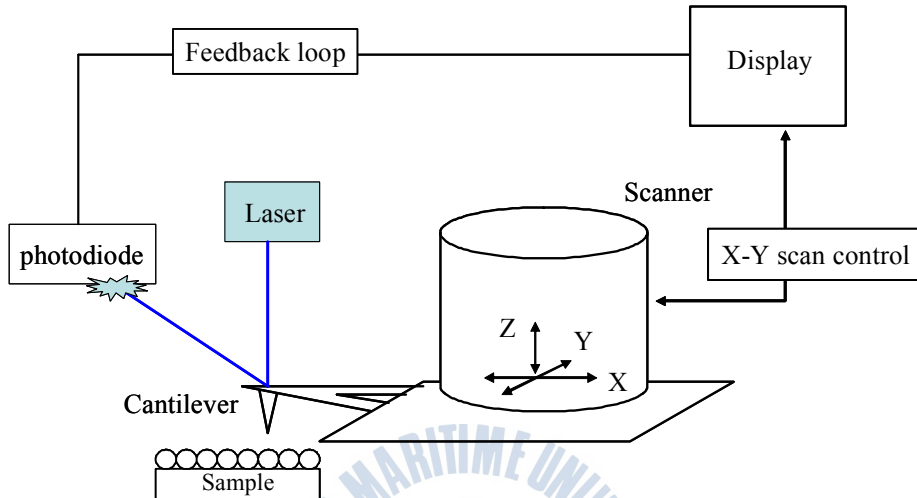


Fig. 2.7 Schematic illustration of AFM [21]

2.2.6 Photoluminescence (PL)

Luminescence는 물질이 빛, 전기, 방사선 등의 에너지를 흡수하여 여기상태가 되고, 바닥상태로 돌아갈 때 흡수한 일부 에너지를 방출하는 현상이다. 이 발광 물질을 형광체 (phosphor) 라 하며, 외부 에너지에 따라 다양하게 구분한다.

PL은 어떤 종류의 화합물이 광선, 자외선 및 X선 등의 자극을 받아 그 파장보다 긴 파장의 발광을 하는 현상이다. 박막의 광학적 특성을 분석하기 위해 사용되며, 밴드갭 이상의 에너지 빛을 조사하면 전자들이 전도대 (conduction band) 로 전이를 하게 되고, 다시 relaxation을 하면서 빛을 방출하는 과정이다. PL의 개략도는 Fig. 2.9와 같으며, 우선 Diode와 UV 광선을 이용하여 샘플이 발광하는가를 확인한 후 샘플을 고정시킨다. 레이저로부터 여기광이 샘플에 조사되고, 렌즈를 이용해 빛을 집속시킨 후 grating을 이용해서 원하는 파장을 갖는 빛만 통과시킨다. 이 때 방출되는 PL 스펙트럼은 monochromator를 지나 검출기에

검출된다. 검출기는 전기적 신호로 바꾸고 lock-in amplifier는 이를 증폭시켜서 방출하는 빛의 파장을 알 수 있다.

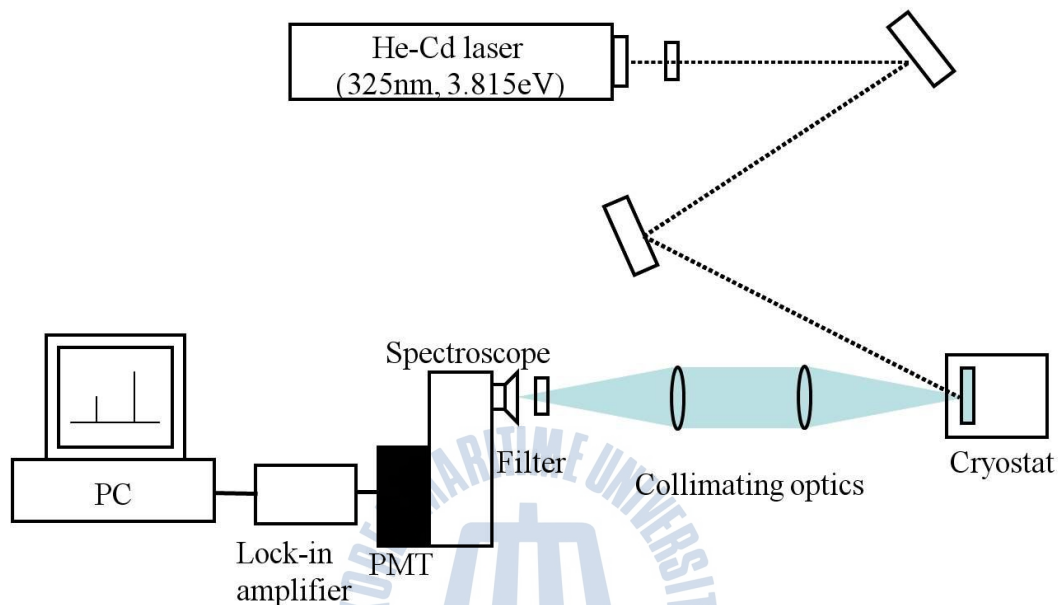


Fig. 2.8 Experimental setup of the PL measurement system in this thesis

일반적으로, PL은 (b) free-exciton 천이를 말하고 상온에서 관찰되는 peak이다. (c)와 (d)는 exciton bound에서 중성 acceptor와 donor 준위사이의 천이를 나타내며, (e)와 (f)는 각각 (d)와 (c)가 이온화된 불순물에 의해 천이된 것이다. (g)는 donor와 acceptor 준위에서의 천이를 보여준다 [23,24].

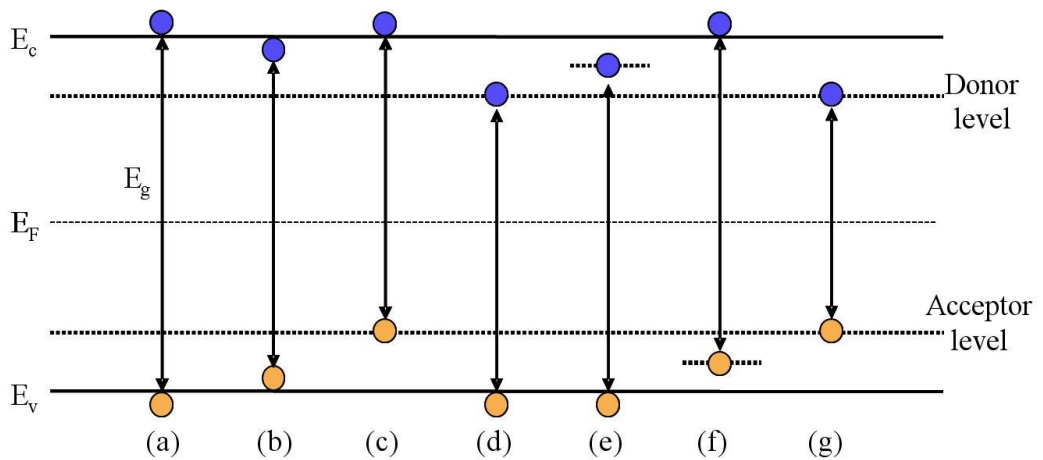


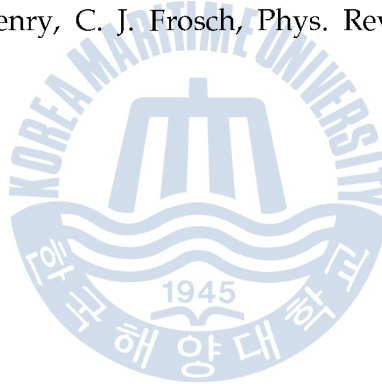
Fig. 2.9 Radiative recombination processes in a semiconductor. Every transition accompanies an emission of energy as a light with different wavelength



참고문헌

- [1] Rainer Behrisch and Wolfgang Eckstein, "Sputtering by particle bombardment", (Springer-Berlin, 1981).
- [2] Gerald Rampf, Infineon; and Robert McCafferty, Curvaceous Software, "Devising an APC strategy for metal sputtering using residual gas analyzers", Technical article, Jul/Aug (2002).
- [3] Bharat Bhushan, "Encyclopedia of Nanotechnology", (Springer Science + Business Media B. V., 2012).
- [4] S. Y. Kim, H. J. Lee, S. H. Park, W. Lee, M. N. Jung, K. Fujii, T. Goto, T. Sekiguchi, J. H. Chang, G. S. Kil, and T. Yao, Journal of Crystal Growth, 312 (2010) 2150.
- [5] L. Gammelgaard, P. Boggild, J. W. Wells, K. Handrup, P. Hofmann, M. B. Balslev, J. E. Hansen, and P. R. E. Petersen, Appl. Phys. Lett. 93 (2008) 093104.
- [6] J. R. Bowler, Appl. Phys. Lett. 98 (2011) 264105.
- [7] H. Saguy and D. Rittel, Appl. Phys. Lett. 89 (2006) 094102.
- [8] H. Saguy and D. Rittel, Appl. Phys. Lett. 91 (2007) 084104.
- [9] Günther Bauer, Wolfgang Richter, "Optical Characterization of Epitaxial Semiconductor Layers", 1st edition (Springer- Verlag Berlin heidelberg, 1996).
- [10] D.K. Bowen and B. K. Tanner: "High resolution X-ray Diffraction and Topography" (Talyor & Francis Ltd, London, United Kingdom, 1998), P52.
- [11] V. T. Cherepin, "Secondary Ion Mass Spectroscopy of Solid Surfaces", (VNU Science Press BV, 1987).
- [12] Benninghoven, Physica Status Solidi A 34 (2) (1969) K169.
- [13] Wittmaack, K. Int. J. Mass Spectrom. Ion Phys. 17 (1975) 39.
- [14] Magee, C. W. et al. Rev. Scient. Instrum. 49 (4) (1978) 477.
- [15] Evans Analytical Group. May 4, 2007. Retrieved 2007-11-22.

- [16] R. Egerton, Physical principles of electron microscopy. Springer (2005).
- [17] 성창모, “투과 전자현미경학 개론”, (반도출판사, 1997).
- [18] H. H. Rose, Science and Technology of Advanced Materials 9 (2008) 014107.
- [19] D. Hull, and J. Bacon, Introduction to dislocations (4th ed.). Butterworth-Heinemann (2001).
- [20] Jana Nebesářová¹, Marie Vancová, Microscopy and Microanalysis 13 (3) (2007) 248.
- [21] Drummy, F. Lawrence, Yang, Martin Junyan , C. David Ultramicroscopy 99 (4) (2004) 247.
- [22] Giessibl, J. Franz, Reviews of Modern Physics 75 (2003) 949.
- [23] E. Fred Schubert, "Doping in III-V Semiconductors", (1993) 60-75.
- [24] P. J. Dean, C. H. Henry, C. J. Frosch, Phys. Rev. 168 (1968) 812.



제 3장. ZnO 성장조건의 최적화

3.1 서론

ZnO는 오랜 기간 동안 연구되어 왔고 [1-3], 넓은 밴드갭을 가진 ZnSe나 GaN 같은 다른 어떤 물질보다 고온에서 더 효율적인 여기자 방출이 일어나는 장점이 있다. 상온에서 넓은 직접 천이형 밴드갭 (3.36 eV) 과 높은 여기자 결합에너지 (60 meV) 를 가지는 특성 때문에 단파장 발광소자에 적합한 물질로 각광받고 있다 [4,5]. 앞서 언급한 ZnO가 가진 물질의 특성을 최대한 활용하기 위해서는 단결정을 갖는 것이 필수적이다. 지금까지 다양한 기판을 사용하여 ZnO 단결정 성장에 많은 노력이 진행되어왔는데, 그 방법으로는 metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) [6], atomic layer deposition (ALD) [7], pulsed laser deposition (PLD) [8], plasma assisted molecular beam epitaxy (PA-MBE) [9] 등으로 연구가 진행되고 있다. 이에 비해 우리는 대면적으로 성장할 수 있다는 장점을 가진 스퍼터를 사용하여 비교적 간단한 방법으로 단결정의 ZnO를 성장하는 실험을 진행하였다. 본 연구에서는 고온에서의 성장으로 형성된 ZnO 층의 전기적 특성과 광학적 특성을 확인하여 유량 변화에 따른 성장률이 grain 형성과 결정성에 미치는 영향에 관하여 연구하였다.

3.2 실험 내용

본 연구에서는 고온 UHV DC magnetron 스퍼터를 이용하여 (0001) 사파이어 기판 위에 ZnO 박막을 증착하였다. 기판은 아세톤, 메탄올, 탈이온수 (DI water) 에 의해 각각 5분간 초음파 세척하였으며, 에칭과 같은 전처리 작업은 수행되지 않았다. 장비의 초기 진공은 1.5×10^{-9} Torr이하의 초고진공 상태를 유지하였고, 성장은 ZnO (99.99 %) 타겟을 사용하여 50 W의 플라즈마를 공급한 상태로 기판온도 900°C 에서 가스유량을 변화시켜 진행하였다. 가스로는 Ar과 O₂를 사용하였으며, mass-flow controller를 이용해 각각 조절하였다. Ar

과 O_2 가스의 유량비는 k 로 표시하였고, k 가 10:0, 10:0.5, 10:1, 10:2, 10:4인 조건에서 각각 실험을 실시하였다. 성장된 ZnO 박막의 두께는 α -step을 이용하여 그 성장률을 확인하였고 XRD를 이용해 구조적 특성을 평가하였다. PL을 이용하여 광학적 특성을 확인하였으며, FPP 측정법으로 면저항을 측정하여 성장률과 관련해 유량비의 차이에 따라 어떤 변화가 있었는지 고찰하였다.

3.3 ZnO 박막의 특성

3.3.1 면저항 측정

그림3.1은 Ar이 10 sccm 일 때 O_2 의 변화에 따른 성장률과 저항의 변화를 보여준다. $k=10:1$ 이하의 조건에서는 성장률이 50-55 nm/h로 느리다가 O_2 양이 증가하게 되면 72.5-85 nm/h로 증가하는 결과로써 900°C 고온에서 k 의 변화에 따라 성장속도에 차이가 있음을 확인하였다. 그리고 FPP 측정을 통해 면저항을 측정한 결과, 성장속도에 비례하는 변화를 보인다는 것을 알 수 있었다. Y. Ma et al. [10]에 따르면 grain 표면에 흡착된 O_2 가 전도전자를 표면에 근접한 부분에서 grain boundary barrier와 neck barrier로 추출해낸다. 그러므로 전위장벽이 증가하게 되고 이는 곧 저항의 증가를 말하며, 흡착되는 O_2 가 많아지면 그 값은 더 커진다. 여기서 grain의 크기가 작다면 같은 면적의 범위에서 grain boundary의 수는 더 많을 것이며 상대적으로 큰 grain에 비해 저항이 클 것이다. $k=10:0$ 과 10:0.5의 성장률이 낮은 조건에서, 면저항을 측정한 결과가 낮은 것으로 보아 grain의 크기가 클 것으로 예상된다.

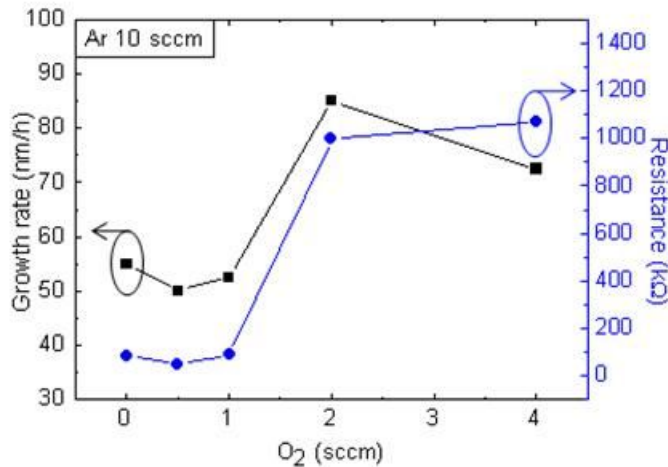


Fig. 3.1 The growth rate and sheet resistance as a function of O₂ flow rate [11]

3.3.2 XRD 분석

실제로 이 결과를 확인하기 위해 XRD 장비를 이용하여 ω 스캔을 측정한 결과를 그림3.2에 나타내었다. 그림3.1에서 알 수 있듯이 k 의 변화에 따라 성장된 ZnO의 박막 두께의 차이가 존재하므로, 우리는 그 두께가 미치는 영향을 최소화하기 위해서 비대칭인 (101) 면의 ω 스캔을 측정하였다. 대체적으로 O₂의 유량이 증가함에 따라 반치폭이 커지는 경향을 보였다. 하지만 $k=10:0.5, 1, 2, 4$ 인 조건의 반치폭 3046, 3228, 3486, 3553 arcsec에 비해 $k=10:0$ 에서 반치폭은 3646 arcsec로 큰 값을 가진다. 이러한 결과는 O₂의 양이 ZnO 성장에 필요한 이상적인 비율에 미치지 못해 산소 공공을 형성함으로써 일부 영역의 변형을 야기한 것으로 판단된다 [12-15]. 이상의 결과에서 O₂의 양이 증가할수록 반치폭과 면저항이 증가하였으며 이를 통해 grain의 크기가 감소한다는 것을 확인할 수 있었다.

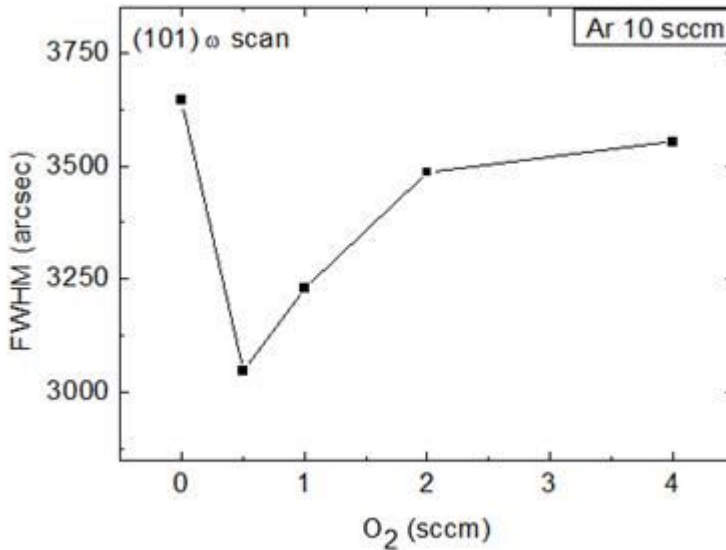


Fig. 3.2 FWHM tendency of ZnO (101) ω scan as a function of O₂ flow rate [11]

최적조건 k=10:0.5에서 성장한 샘플의 결정성을 알아보기 위해 (002) ω 스캔과 pole figure를 측정하였고, 그 결과가 각각 Fig. 4(a), (b)에 나타나 있다. Fig. 4(a)는 (002) ω 스캔에서 가지는 반치폭이 1298 arcsec로, 스퍼터로 성장시킨 ZnO 박막이 비교적 양호한 결정성을 갖고 성장된 것을 의미한다 [6,17]. Fig. 4(b)는 성장한 ZnO의 (101) pole figure 측정결과이며, 360°의 범위 안에 60°의 간격을 갖는 6개의 회절이 나타난 것으로 보아 성장된 ZnO 박막은 단결정을 이루고 있다는 것이 확인되었다 [6,17].

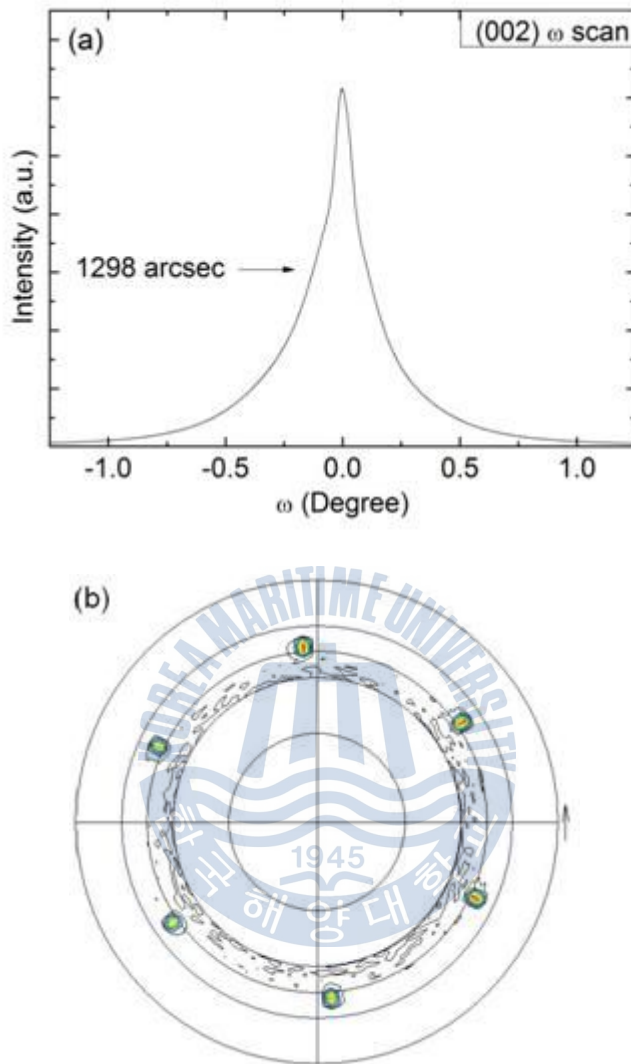


Fig. 3.3 (a) (002) ω scan, (b) (101) pole figure results of ZnO film at k=10:0.5 [11]

3.3.3 저온 PL 측정

성장된 ZnO의 광학적 특성을 알아보기 위해 He-Cd 레이저 (325 nm) 를 사용하여 12 K에서 PL 측정을 실시하였으며 그 결과를 그림 3.3에 나타내었다. ZnO의 발광 밴드는 크게 두 가지 영역으로 나눌 수 있는데, UV 영역 (3.26 eV)에

서 ZnO의 에너지 밴드갭에 근접하여 발생하는 밴드단 발광과 가시광 영역에서 발생하는 딥레벨 영역에서의 발광으로 나눌 수 있다. 그림3.3에서 $k=10:0.5$ 를 제외한 모든 조건에서는 밴드단 부근에서의 발광이 딥레벨 발광 강도보다 낮은 반면, $k=10:0.5$ 에서는 밴드단 (3.2 eV) 부근의 발광이 딥레벨 발광보다 우세한 결과를 확인할 수 있다. 밴드단 부근의 발광은 결정성과 관련이 있고 딥레벨 발광의 경우 결정간의 경계와 결함에 연관되어 발생하는데 [16,17], 본 연구에서 그림3.1과 그림3.2에서 확인한 바와 같이 큰 grain size를 갖고 구조적으로 좋은 결정성을 갖는 $k=10:0.5$ 의 유량비 조건이 ZnO 성장의 최적 조건인 것이 광특성에서도 나타난다. 하지만 $k=10:0 \sim 10:1$ 사이에서 그림3.1에 나타난 성장률과 저항 값의 변화와는 달리, 그림3.3에서 나타난 동일 조건에서의 결과들이 현저한 스펙트럼의 차이를 보여주는 것은 O_2 의 작은 양의 변화에도 박막의 광특성이 크게 의존한다는 것을 시사한다.

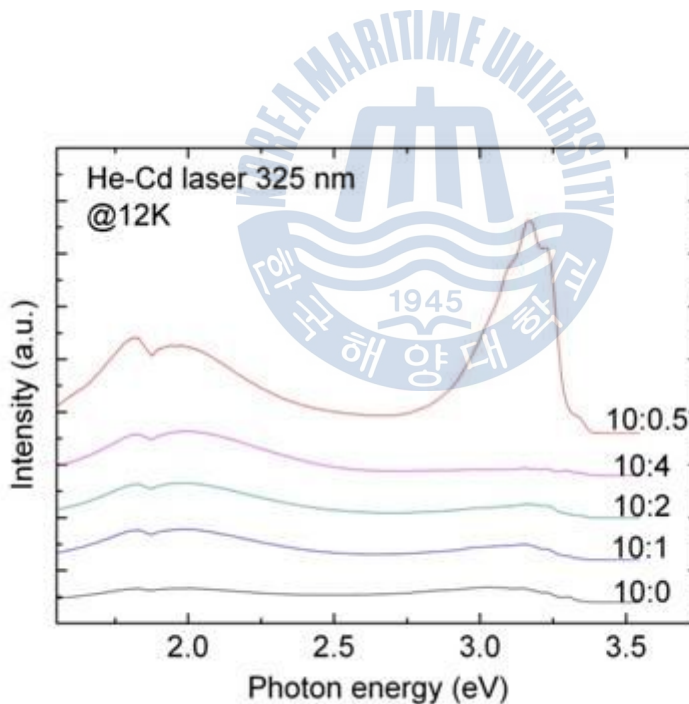


Fig. 3.4 PL spectra of ZnO films at 12 K [11]

3.3.4 표면 관찰

성장된 ZnO층의 표면형상을 관찰하기 위해 AFM을 측정하였다. 앞서 나타난 구조적 결과와 비교해 보았을 때, Fig. 3.5(b)는 다른 조건의 결과들 보다 결정 입자의 크기가 상대적으로 크고 부드러운 표면을 가질 것이고 O₂의 유량이 증가함에 따라 입자의 크기가 작아질 것이라 예상하였는데 예상과는 다른 양상의 결과를 보였다. 이 부분에 대한 추가적인 측정과 분석이 필요하다.

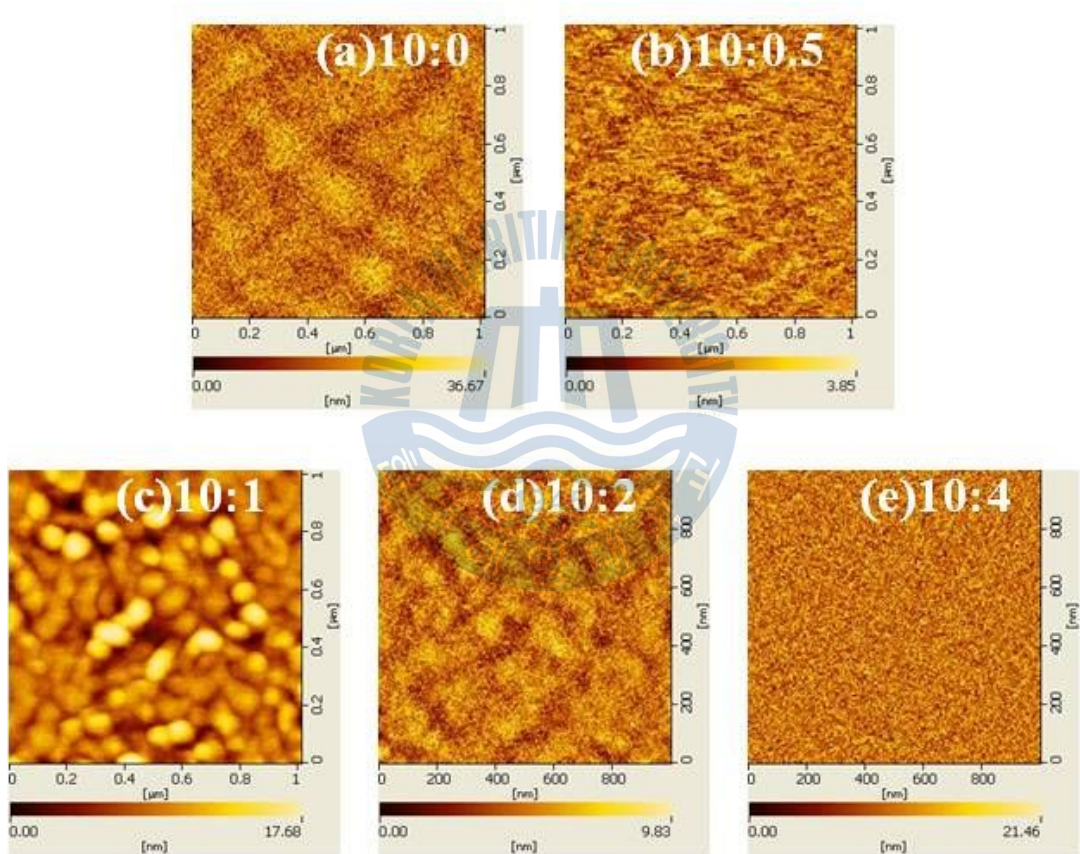


Fig. 3.5 AFM images as a function of Ar:O₂ ratio (a) 10:0, (b) 10:0.5, (c) 10:1, (d) 10:2, and (e) 10:4

3.4 결론

본 연구에서는 UHV DC 스퍼터를 사용하여 $c\text{-Al}_2\text{O}_3$ 기판 위에 ZnO 박막을 성장하였으며 O_2 의 유량변화에 따라 나타나는 특성을 FPP, PL, XRD 측정을 통해 알아보았다. $k=10:1$ 이상에서, 과도한 O_2 공급으로 인해 빠른 성장을 야기시켜 ZnO 박막의 결정성 저하를 확인하였고, $k=10:0.5$ 에서 최적조건을 가졌다. (002) ω 스캔결과 성장된 ZnO 박막은 단결정을 갖는 것을 (101) pole figure 측정을 통해 확인하였다.



참고문헌

- [1] D. G. Thomas, J. Phys. Chem. Solids 3 (1957) 229.
- [2] P. Wagner and R. Helbig, J. Phys. Chem. Solids 35 (1974) 327.
- [3] D. C. Look, Mater. Sci. Eng. B 80 (2001) 383.
- [4] E. M. Wong and P. C. Searson, Appl. Phys. Lett. 74 (1999) 2939.
- [5] D. M. Bagnall, Y. F. Chen, Z. Zhu, T. Yao, M. Y. Shen, and T. Goto, Appl. Phys. Lett. 73 (1998) 1038.
- [6] J. H. Park, S. J. Jang, S. S. Kim, B. T. Lee, Appl. Phys. Lett. 89 (2006) 121108.
- [7] S. Yang, C. C. Kuo, W. R. Liu, B. H. Lin, H. C. Hsu, C. H. Hsu, and W. F. Hsieh, Appl. Phys. Lett. 100 (2012) 101907.
- [8] C. Liu, S. H. Chang, M. Abouzaid, P. Ruterana, H. H. Lee, D. W. Kim, and T. W. Noh, Appl. Phys. Lett. 90 (2007) 011906.
- [9] H. J. Ko, Y. F. Chen, S. K. Hong, and T. Yao, J. Appl. Phys. 92 (2002) 4354.
- [10] Y. Ma, W. L. Wang, K.J. Liao, and C.Y. Kong, Journal of Wide Bandgap Materials 10 (2002) No.2,113.
- [11] 유진엽, 최성국, 조유진, 이상태, 이원재, 장지호, 새물리, 61 (2011) 530.
- [12] S. K. Lee and J. Y. Son, Appl. Phys. Lett. 100 (2012) 132109.
- [13] P. Erhart, K. Albe, and A. Klein, Phys. Rev. B 73 (2006) 205203.
- [14] F. A. Selim, M. H. Weber, D. Solodovnikov, and K. G. Lynn, Phys. Rev. Lett. 99 (2007) 085502.
- [15] A. Janotti and C. G. Van de Walle, J. Cryst. Growth 287 (2006) 58.
- [16] B. K. Meyer, H. Alves, D. M. Hofmann, W. Kriegseis, D. Forster, F. Bertram, J. Christen, A. Hoffmann, M. Straßburg, M. Dworzak, U. Haboeck, and A. V. Rodina, Phys. Stat. Sol. (b) 241 (2004) No.2,231.
- [17] D. K. Hwang, H. S. Kim, J. H. Lim, J. Y. Oh, J. H. Yang, S. J. Park, K. K. Kim, D. C. Look, and Y. S. Park, Appl. Phys. Lett. 86 (2005) 151917.

- [18] K. K. Kim, J. H. Song, H. J. Jung, W. K. Choi, S. J. Park, and J. H. Song, J. App. Phys. 87 (2000) 3573.



제 4장. 고상성장법을 이용한 ZnAl_2O_4 형성

4.1 서론

ZnAl_2O_4 는 자연적으로 미네랄 가나이트(gahnite)로 발생하는 spinel 구조의 한 집단이다. 현재까지 ZnAl_2O_4 는 포화상태의 알콜이 에틸렌계 수소화합물(olefin)로 되는 과정, 메탄올과 알콜의 합성과정, 폴리메틸벤젠의 생성과정 아세토펜으로부터 스티렌으로의 합성과정, 알켄의 두 개의 결합 혼합물 변환과 탈수과정에서 촉매로 이용되어 왔다 [1-5]. 거기에, ZnAl_2O_4 는 고열안정성과 낮은 산도를 가지고, 소수성 작용을 하므로 촉매 기폭제로 사용될 수 있다. 그리고 Pt와 Pt/Sn이 소결하는 것을 막는 것처럼 강한 금속-지지 상호작용을 하기도 한다 [6]. ZnAl_2O_4 를 얻어내는 방법으로는 고상 반응을 통하여 합성되거나 공동침전(coprecipitation), 열수작용(hydrothermal) 및 여러 가지 유기물질로 얻는 sol-gel 방법 등이 있다 [7-10]. 이 중 고상 반응을 통해서 ZnO와 단결정 Al_2O_3 기판 사이의 반응 시 반응 생성물들의 여러 가지 방향성을 제거하는 효과가 있을 수 있으며 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 기판위에 ZnAl_2O_4 가 나타나는 것은 표면에너지 변화와 마찬가지로 GaN에 격자일치를 개선하는 것을 도울 수 있다고 이미 연구되어 있다[11]. 따라서 ZnAl_2O_4 가 GaN기반의 물질 성장에 기판으로서 좋은 합성물이 될 수 있다고 기대된다.

4.2 실험 내용

본 실험에서는 c-사파이어 기판 위에 스퍼터를 이용해 c-ZnO를 증착하였고, 열 증착기를 이용해 Al을 증착하여 열처리를 가하여 고상성장법을 실시하였다. 열처리는 수평형 퍼니스에서 표면이 개방된 상태로 반응가스를 흘려주지 않은 대기압 내에서 석영관의 입구를 막고 배출구의 절반은 열어둔 상태로 진행되었으며, 열처리 시간은 30분, 1시간, 1시간 30분, 2시간의 범위로, 열처리 온도는 475°C 에서부터 675°C 에 이르는 온도에서 진행되었다. XRD 측정을 통해 ZnAl_2O_4 형성에 최적조건을 확인하였고, SIMS 깊이측정으로부터 적층구조 내

에 존재하는 두께 범위를 추측할 수 있었다.

4.3 ZnAl₂O₄의 특성

4.3.1 XRD 분석

Fig. 4.1(a)는 열처리 온도의 변화에 따른 XRD 결과를 보여주고 있는데, 열처리 전, 475°C, 575°C, 625°C, 675°C의 온도로 각각 90분 간 열처리가 진행된 샘플의 측정 결과이다. 575°C 이상에서 ZnAl₂O₄ (311)과 (400)의 회절이 발생하는 것이 확인되었으며, 675°C에서는 Al의 회절강도가 다른 열처리 온도영역에 비해 현저히 떨어지고 AlO의 회절이 나타남을 확인할 수 있다. 이는 Al의 녹는점 (660°C) 이상인 조건에서, Al이 ZnO층으로의 확산속도에 비해 표면에서 대기중의 수증기내에 존재하는 산소와 급속히 산화 반응하여 불완전 결합으로 인한 AlO (JCPDS 75-0278)의 생성으로 45.18° 부근에서의 회절강도가 나타났다고 판단된다. Fig. 4.1(b)는 575°C에서 시간의 변화에 따른 XRD 결과로써 열처리 전, 30분, 60분, 90분, 120분 간 열처리 한 결과이다. 575°C에서는 시간이 크게 영향을 미치지 않았고 30분 이상의 기간이면 ZnAl₂O₄가 형성될 수 있다는 결과를 보여준다.

Fig. 4.1에서 보인바와 같이 30분 간 열처리를 실시하였을 때부터 (311) / (400) 강도비는 시간이 증가하여도 큰 변화가 관찰되지 않았다. 또한 Al(111) 회절강도는 열처리 시간과 거의 무관한 결과를 나타냈다. 이 두 가지 점은 ZnAl₂O₄의 형성이 열처리 온도에는 크게 의존하지만 열처리 시간에 대해서는 상대적으로 의존성이 낮음을 시사한다. 즉 확산은 아래의 관계식 (1)로 나타낼 수 있는데 여기서 C는 농도 분포도, Q는 계면에서의 경계치, D는 확산계수, t는 시간, x는 계면으로부터의 거리, k는 반응률 계수, Ea는 활성화 에너지를 나타낸다.

$$C(x,t) = \frac{Q}{(\pi Dt)^{1/2}} \exp\left(\frac{-x^2}{4Dt}\right) \quad (4.1)$$
$$D = D_0 \exp(-E_a/kT)$$

이 식에서 t 에 따라 변화가 작다는 것은 D 가 작아야 하므로 Fig. 4.2에서 실험한 625°C 에서는 Al이 ZnO로 확산할 경우 확산 계수가 매우 작다는 것을 의미한다.

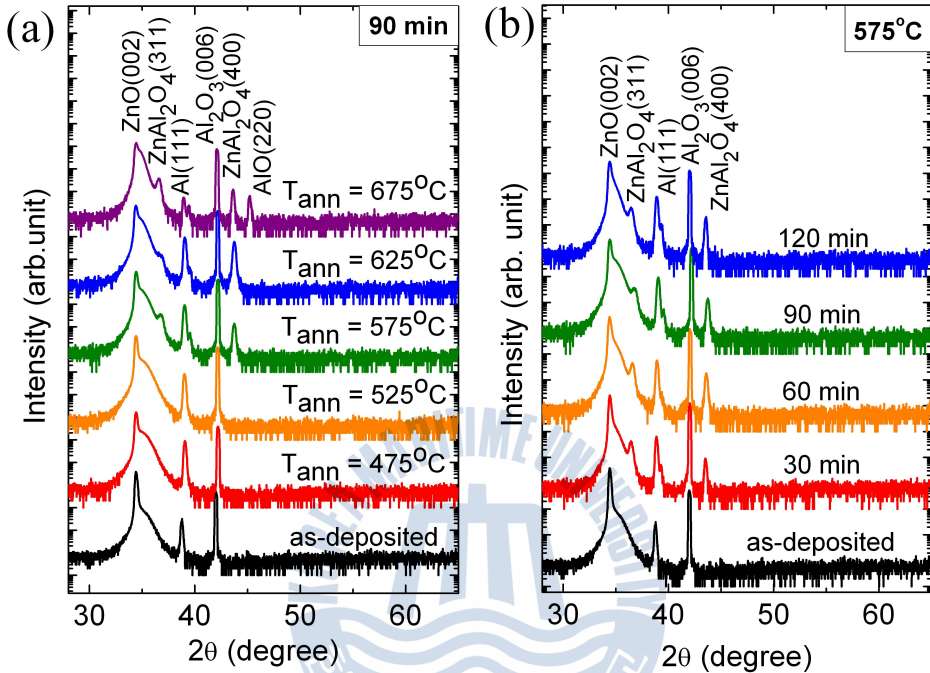


Fig. 4.1 X-ray diffraction of Al/ZnO/Al₂O₃ samples annealed at various (a) temperatures and (b) times

4.3.2 SIMS 분석

열처리를 통하여 Al층과 ZnO층 사이의 확산을 유도하여 spinel 구조를 얻어냄에 따라 적층된 구조의 성분 분석을 하기 위해 SIMS 측정을 실시하였다. Al/ZnO/Al₂O₃ 샘플과 (b) 575°C에서 열처리 한 샘플의 결과가 Fig. 4.2에 나타나 있다. Fig. 4.2에서 150 nm로 증착된 Al과 ZnO가 Al₂O₃ 기판 위에 증착되어 있는 것을 관찰할 수 있다. 이와 달리, Fig. 4.2의 결과는 열처리를 통해 170 nm에서부터 225 nm부근에서 ZnAl₂O₄ 보호층 50 nm정도가 ZnO 층 위에 형성되었음을 보여주고 있다.

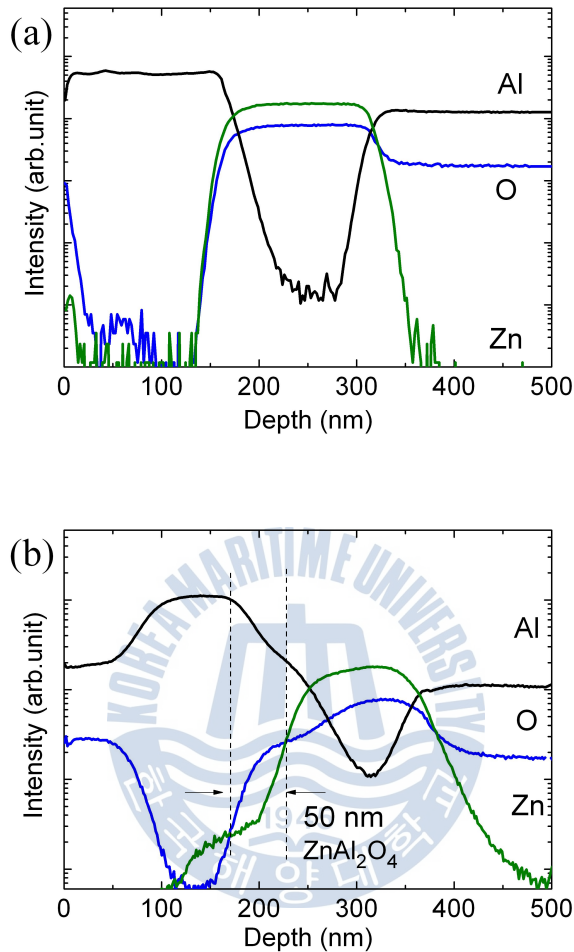


Fig. 4.2 SIMS depth profile of (a) Al deposited (b) annealed at 575°C samples

4.4 결론

스퍼터를 이용해 성장한 ZnO 위에 Al 증착 및 열처리를 통한 고상 성장법으로 ZnAl₂O₄를 생성하고, 열처리 온도와 시간에 따른 ZnAl₂O₄ 성장조건을 고찰하였다. 열처리 온도가 575°C 이상에서부터 ZnAl₂O₄가 생성되는 것이 확인되었고, Al 용점 이상에서는 확산계수가 크게 증가함을 확인할 수 있었다. 575°C에서

시간을 변화시키며 고상성장을 진행한 결과 확산 계수가 작아 시간에 따른 변화는 매우 작았다. 본 연구의 경우 (311) / (004) 면이 혼재하여 나타났고, Al의 용점 이하에서는 시간에 따른 변화가 적어 막 두께 제어가 용이할 것으로 판단된다. 향후과제로써 열처리 후 표면에 생성되는 알루미늄 산화물의 제거를 고려해야하고, ZnAl_2O_4 의 존재가 온전한 층을 가지고 ZnO층을 덮고 있는지 여부를 확인하는 절차가 수반되어야 할 것이다.



참고문헌

- [1] T. K. Shioyama, US Patent 4.260.845 (1981).
- [2] F. Le Pelier, P. Chaumette, J. Saussey, M. M. Bettahar, and J. C. Lavalley, Mol. Catal. A. Chemical, 122 (1997) 131.
- [3] Cobb, L. R., US Patent 4.568.784, 1985.
- [4] R. Roesky, J. Weiguny, H. Bestgen, and U. Dingerdissen, Appl. Catal. A., 176 (1999) 213.
- [5] M. B. Welch, US Patent 4.692.430 (1986).
- [6] G. Aguilar-Rios, M. Valenzuela, P. Salas, H. Armendáriz, P. Bosch, G. Del Toro, R. Silva, V. Bertin, S. Castillo, A. Ramirez-Solis, and I. Schifter, Appl. Catal. A: General, 127 (1999) 65.
- [7] W. -S. Hong, L. C. De Jonghe, X. Yang, and M. N. Rahaman, J. Am. Ceram. Soc., 78 (1995) 3217.
- [8] M. A. Valenzuela, J. P. Jacobs, P. Bosch, S. Reije, B. Zapata, and H. H. Brongersma, Appl. Catal. A: General, 148 (1997) 315.
- [9] M. Zawadzki, and J. Wrzyszczyk, Mater. Res. Bull., 35 (2000) 109.
- [10] S. Mathur, M. Veith, M. Haas, H. Shen, N. Lecerf, V. Huch, S. Hüfner, R. Haberkorn, H. P. Beck, and M. Jilavi, J. Am. Ceram. Soc., 84 (2001) 1921.
- [11] S. L. Gu, R. Zhang, J. S. Sun, L. Z. Zhang, and T. F. Quech, MRS Internet Journal of Nitride Semiconductor Research, 5 (2000) U124.

제 5장. GaN 성장에 미치는 ZnAl_2O_4 층의 영향

5.1 서론

넓은 밴드갭을 가진 반도체는 다양한 산업분야에서 응용되고 있으며, 그 중 GaN는 상업적인 면에서 중요한 재료로 손꼽힌다. 하지만 광소자 응용시 고효율을 구현하기 위해서 고품질의 GaN가 필수적이므로, GaN를 다루는데 있어 가장 중요한 점은 기판을 마련하는 것이다.

GaN 기판이나 template을 얻을 수 있는 LPE [1], ammonothermal [2], HVPE [3]와 같은 성장방법 중에 HVPE가 비교적 빠르고 좋은 결정질을 가지므로 비용적인 측면에서 가장 효율적이다. 기판제작 과정에는 두 가지 중요한 단계가 필요하다. 첫째는 기판 상에 후막을 성장할 수 있어야하는 것이고, 둘째는 그것을 기판으로부터 얼마나 잘 분리해 내느냐 하는 것이다. 이와 관련해 많은 연구가 진행되어 왔으나 기판 분리과정에서 어려운 점이 남아있다. Laser lift-off의 경우 균열과 잔여응력, 휘어짐으로 인해 박막 품질이 저하된다 [4,5]. 다른 방법들은 복잡한 과정을 수반하는 단점을 가지고 있다 [6,7]. 따라서 새로운 기판 분리방법으로는 손상을 최소화 할 수 있는 Chemical lift-off가 적합하다고 본다.

ZnO 는 GaN와 결정구조가 같으며, 격자상수 차이가 1.8% (c-축)와 0.4% (a-축)로 매우 적은 편이다 [8,9]. 또한 화학적으로 쉽게 분해시킬 수 있다 [10-14]. 그러므로 GaN를 성장시키는데 ZnO 가 가장 적합한 후보재료라 판단되어 이와 관련한 연구는 이미 많이 진행되어 왔다 [15,16]. 그러나 HVPE를 이용한 성장에서는 열악한 GaN의 성장환경 조건에서 H_2 나 HCl 에 의해 ZnO 의 에칭이 먼저 일어나고, 계면에서의 확산으로 인해 GaN 층의 결정성이 저하되는 결과가 보고되어 있다 [14]. 따라서 본 연구에서는 ZnO 층 위에 ZnAl_2O_4 를 형성하여 GaN 성장시 에칭되는 ZnO 를 보호하여 GaN층으로의 확산을 막고자 하였다. HVPE GaN 성장시 ZnO 를 보호하는 ZnAl_2O_4 의 필요성을 조사를 통해 알 수 있었다.

5.2 실험 내용

GaN는 HVPE를 이용해 ZnAl_2O_4 층 위에 성장되었다. 저온버퍼 ($\sim 2.5 \mu\text{m}$) 850°C 에서 V/III ratio가 ~ 50 인 조건에서 성장한 GaN층 위에 고온 ($\sim 40 \mu\text{m}$) 1020°C 에서 V/III ratio가 ~ 20 인 조건에서 성장을 실시하였다. 성장조건은 아직 최적화 되지 않은 상태이다. 그리고 초기 성장단계의 계면 상태를 확인하기 위하여 저온버퍼 조건에서만 수행한 GaN도 준비하였다. 또한 ZnO의 확산을 방지하는 ZnAl_2O_4 의 보호층 역할을 확인하기 위하여 ZnAl_2O_4 가 있는 샘플과 없는 샘플 두 가지로 나누어 비교하였다.

5.3 HVPE GaN의 특성

5.3.1 표면 형상

성장한 GaN의 표면 형상을 관찰하기 위해 AFM을 이용하여 측정한 결과가 Fig. 5.1에 나타나있다. Fig. 5.1(a) ~ (d)는 ZnO와 ZnAl_2O_4 위에 성장된 두 방법의 GaN 성장층의 $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ 사진을 보여준다. 표면 사진에서 나타난 입자의 평균 크기는 각각 (a) 290 nm (LT-GaN/ZnO), (b) $1.4 \mu\text{m}$ (HT/LT-GaN/ZnO), (c) 680 nm (LT-GaN/ ZnAl_2O_4), (d) $2.14 \mu\text{m}$ (LT-GaN/ ZnAl_2O_4)이다. 저온성장에서의 2-step 성장에서의 경우 모두 ZnAl_2O_4 위에 성장한 즉, 보호층이 있는 경우에 성장된 GaN 입자가 큰 사이즈를 갖는다. 이러한 결과로부터 ZnAl_2O_4 를 사용한 층의 GaN에서 보다 나은 결정성을 기대할 수 있다.

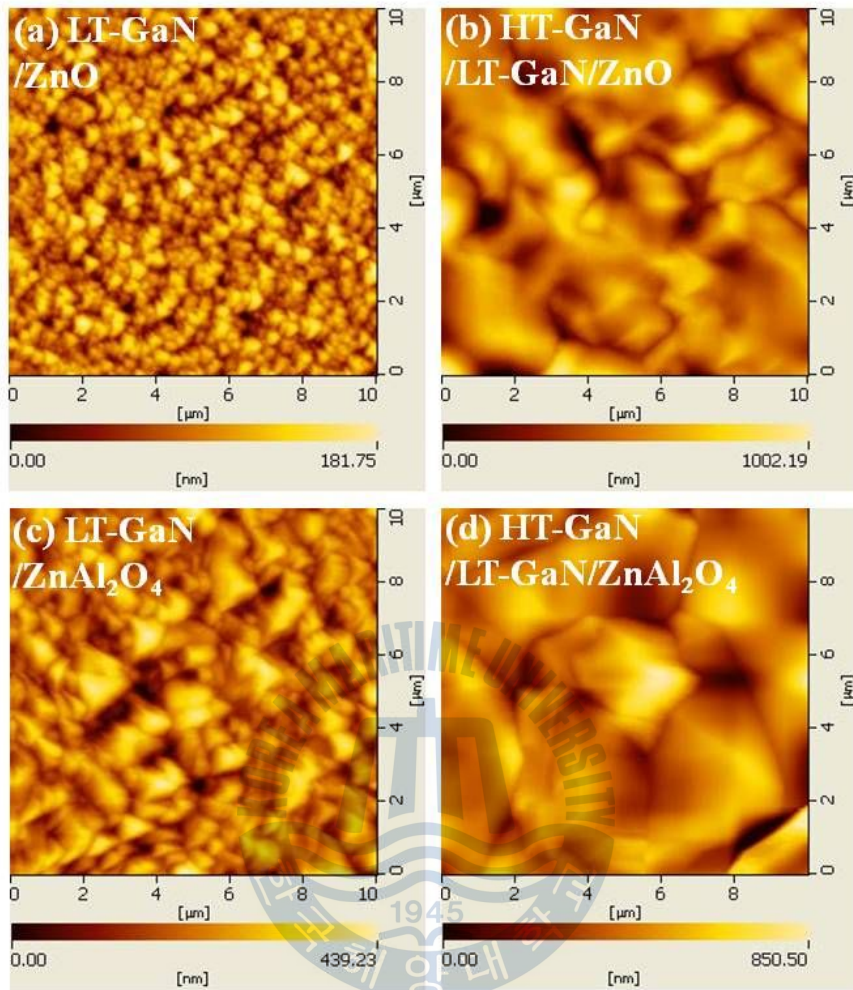


Fig. 5.1 AFM images of (a) LT-GaN and (b) 2-step GaN grown on ZnO layers, (c) LT-GaN and (d) 2-step GaN grown on ZnAl₂O₄, respectively

5.3.2 TEM 측정

표면 관찰에 이어 결정성을 조사하기 위해 TEM 측정을 실시하였다. 성장시킨 GaN 층의 단면 TEM 명시야상 이미지가 Fig. 5.2에 나타나있다. Fig. 5.2(a)와 (b)는 각각 ZnO 위에 성장한 GaN의 $g=[0002]$ 와 $g=[11-20]$ 방향의 명시야상 결과이다. screw와 edge dislocation 밀도는 각각 $2.6 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$ 와 $1.3 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$,

respectively. Fig. 5.2(c)와 (d)는 각각 ZnAl_2O_4 위에 성장한 GaN의 $g=[0002]$ 와 $g=[11-20]$ 방향의 명시야상 결과이다. screw와 edge dislocation 밀도는 각각 $8.4 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 와 $6.3 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 이다. AFM 결과에서도 나타났듯이 ZnAl_2O_4 위에 성장한 GaN의 경우가 ZnO 위에 성장한 것보다 입자의 평균크기도 크고, 결함의 밀도가 낮은 것을 관찰할 수 있다. 또한 초기성장단계에서 발생하는 결함의 밀도 역시 성장이 진행됨에 따라 ZnAl_2O_4 의 경우 결함의 감소율이 월등히 크다는 것을 보여주고 있다.

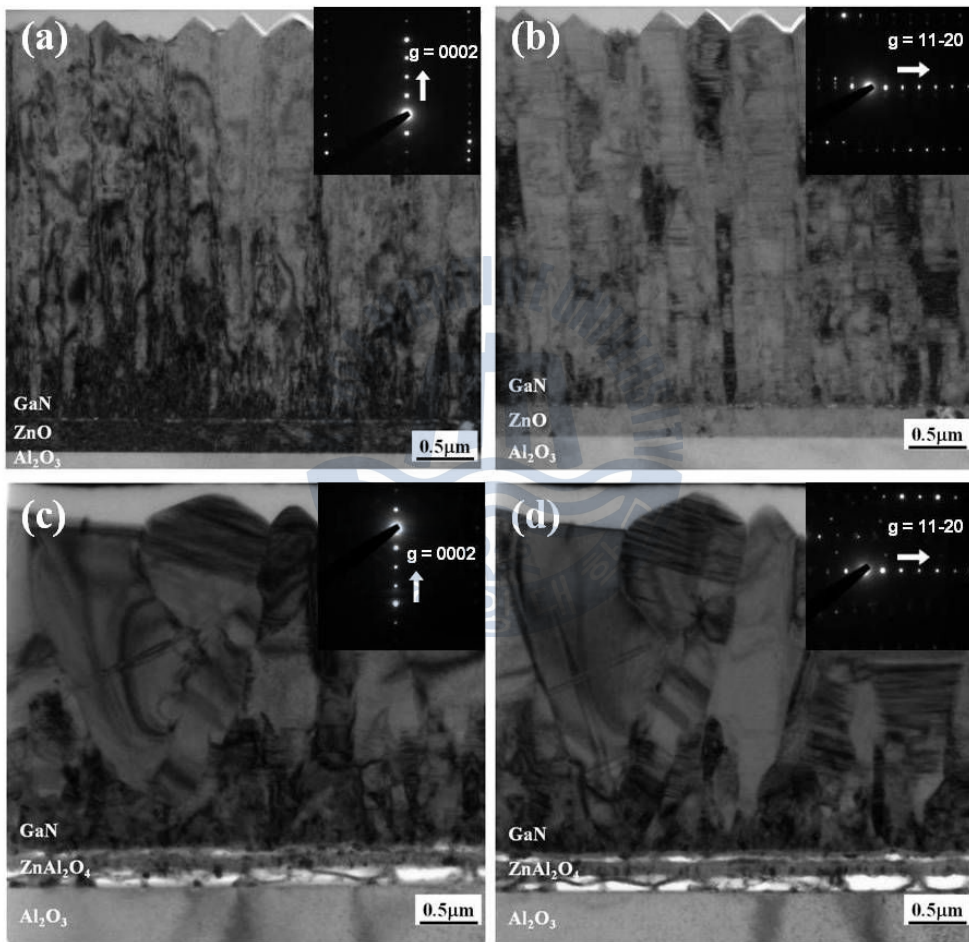


Fig. 5.2 Cross-sectional TEM images of LT-GaN. The BF images of (a) (0002) and (b) (11-20) direction of grown on ZnO, (c) (0002) and (d) (11-20) direction of grown on ZnAl_2O_4 as well

5.3.3 SIMS 분석

ZnO와 ZnAl_2O_4 위에 저온 성장한 GaN를 적층된 구조의 깊이에 따른 분석을 위해 SIMS 측정을 실시하였다. Fig. 5.3(a)를 통해 Zn의 확산이 GaN 쪽으로 다량 일어났음을 확인할 수 있다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 Zn의 확산 범위는 1300 nm 지점에서부터 2700 nm 지점까지 대략 1400 nm에 걸쳐 검출되었다. 반면, ZnAl_2O_4 를 형성한 샘플의 경우 GaN 층으로의 Zn확산은 눈에 띄게 줄어들음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 ZnAl_2O_4 가 GaN 성장동안 Zn의 확산을 방지하는데 커다란 역할을 한다는 것을 명백하게 보여주는 증거이다.

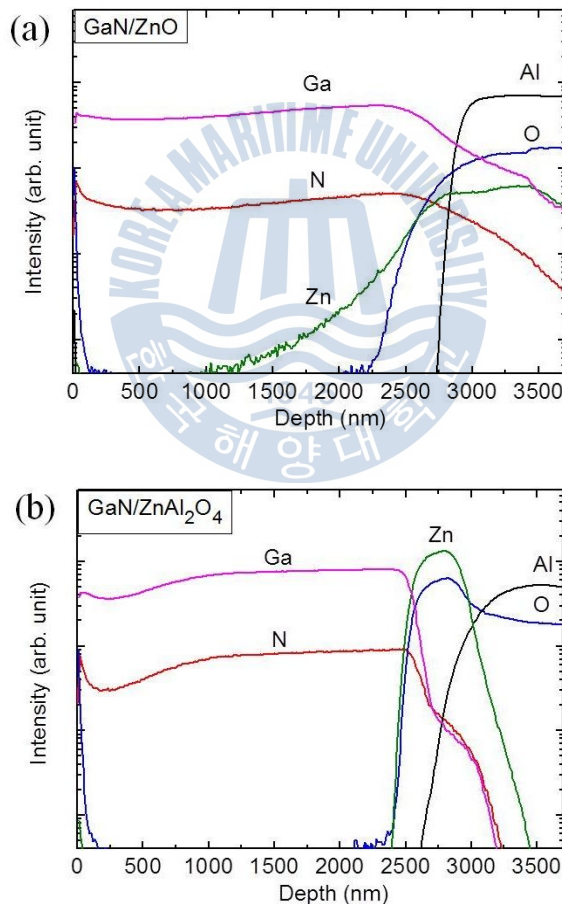


Fig. 5.3 SIMS depth profile of LT-GaN on (a) ZnO and (b) ZnAl_2O_4 , respectively

5.3.4 저온 PL 측정

ZnO의 확산 방지에 대하여 ZnAl_2O_4 의 효과를 확인하기 위해 저온 PL 측정을 실시하였다. Fig. 5.4(a)는 2-step GaN를 성장한 PL 측정의 결과이다. ZnAl_2O_4 층에 성장시킨 GaN는 ZnO 층에 성장시킨 것보다 더 높은 강도의 밴드단 발광을 보여준다. 이에 반해 LT-GaN를 성장시킨 결과인 Fig. 5.4(b)는 대조적인 스펙트럼을 보여준다. spinel 층 없이 ZnO 위에 성장한 LT-GaN의 경우 Zn의 확산으로 인해 발생하는 밴드 중심이 2.9 eV인 발광이 지배적이다 [17-20]. 하지만 ZnAl_2O_4 spinel 층에 성장한 LT-GaN에 성장시킨 경우에는 강한 밴드단 발광을 나타낸다 (~ 3.32 eV).

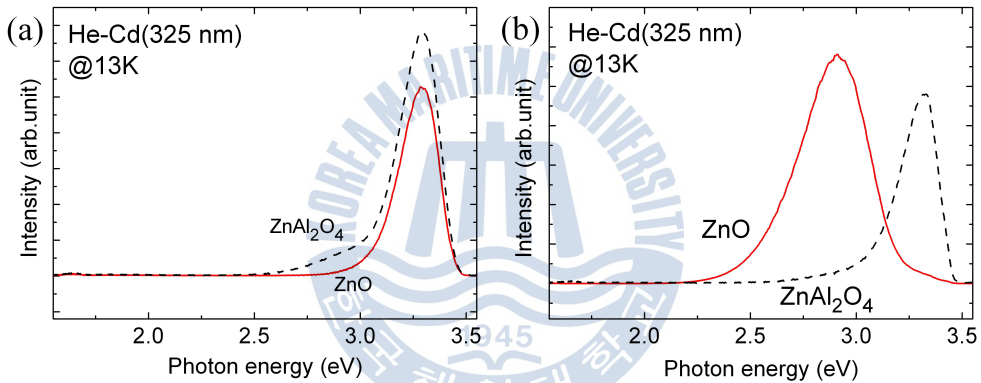


Fig. 5.4 PL spectra of HVPE GaN samples. (a) 2-step GaN samples, and (b) LT-GaN samples

5.4 결론

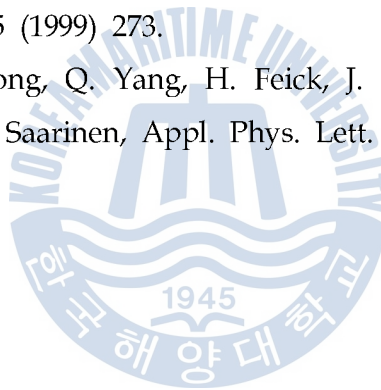
HVPE GaN 성장환경에서 ZnO의 확산을 막기 위해 ZnAl_2O_4 spinel 층을 도입하였다. HVPE를 이용해 GaN를 ZnAl_2O_4 층 위에 성장하였고, 성장온도는 저온 성장조건 (850°C)에서와 고온 성장조건 (1020°C)에서 실시하였다. 초기 성장단계의 계면 상태를 살펴보기 위하여 저온버퍼 조건에서 성장시킨 두께 $2.5\mu\text{m}$ 인 GaN의 분석을 통해 ZnO의 확산을 확인하였다. 또한 ZnO의 확산을 방지하는 ZnAl_2O_4 의 보호층 역할을 확인하기 위하여 ZnAl_2O_4 가 있는 샘플과 없는 샘플 두 가지로 나누어 비교하였다. 성장시킨 GaN의 분석은 AFM, TEM, SIMS, PL을 이용하여 이루어졌으며, 측정을 통해 ZnAl_2O_4 층이 쉽고 간단하게 만들어졌음에도, GaN 층의 결정성 향상과 ZnO의 확산을 줄이는데 매우 유용하다는 결과를 확인할 수 있었다.



참고문헌

- [1] M. Morishita, F. Kawamura, M. Kawahara, M. Yoshimura, Y. Mori, and T. Sasaki, *J. Cryst. Growth*, 270 (2004) 402.
- [2] S. F. Chichibu, T. Onuma, T. Hashimoto, K. Fujito, F. Wu, J. S. Speck, and S. Nakamura, *Appl. Phys. Lett.*, 91 (2007) 251911.
- [3] C. L. Chao, C.H. Chiu, Y. J. Lee, H. C. Kuo, P. C. Liu, J. D. Tsay, and S. J. Cheng, *Appl. Phys. Lett.*, 95 (2009) 051905.
- [4] Y. S. Jang, W. R. Kim, D. H. Jang, J. I. Shim, and D. S. Shin, *J. Appl. Phys.*, 107 (2010) 113537.
- [5] M. Q. Wang, Y. Wang, Y. J. Sun, G. Y. Zhnag, Y. Z. Tong, and H. L. Duan, *Int. J. Solids Struct.*, 49 (2012) 1701.
- [6] S. Bohyama, H. Miyake, K. Hiramatsu, Y. Tsuchida, and T. Maeda, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 44 (2005) L24.
- [7] Y. Oshima, T. Eri, M. Shibata, H. Sunakawa, K. Kobayashi, T. Ichihashi, and A. Usui, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 42 (2003) L1.
- [8] Ü. Özgür, Y. I. Alivov, C. Liu, A. Teke, M. A. Reshchikov, S. Doğan, V. Avrutin, S. J. Cho, and H. Morkog, *J. Appl. Phys.*, 98 (2005) 041301.
- [9] A. Kobayashi, S. Kawano, Y. Kawaguchi, J. Ohta, and H. Fujioka, *Appl. Phys. Lett.*, 90 (2007) 041908.
- [10] J. Sun, J. Bian, H. Liang, J. Zhao, L. Hu, Z. Zhao, W. Liu, and G. Du, *Applied Surface Science*, 253, (2007) 5161.
- [11] J. G. E. Gardeniers, Z. M. Rittersma, and G. J. Burger, *J. Appl. Phys.*, 83 (1998) 7844.
- [12] H. Maki, T. Ikoma, I. Sakaguchi, N. Ohashi, H. Haneda, J. Tanaka, and N. Ichinose, *Thin Solid Films*, 411 (2002) 91.
- [13] Y. Li, G. S. Tompa, S. Liang, C. Gorla, Y. Lu, and J. Doyle, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 15 (1997) 1063.
- [14] S. W. Lee, T. Minegishi, W. H. Lee, H. Goto, H. J. Lee, S. H. Lee, H. J.

- Lee, J. S. Ha, T. Goto, T. Hanada, M. W. Cho, and T. Yao, Appl. Phys. Lett., 90 (2007) 061907.
- [15] T. Detchprohm, H. Amano, K. Hiramatsu, and I. Akasaki, J. Cryst. Growth, 128 (1993) 384.
- [16] A. Kobayashi, Y. Kawaguchi, J. Ohta, H. Fujioka, K. Fujiwara, and A. Ishii, Appl. Phys. Lett., 88 (2006) 181907.
- [17] T. Suzuki, C. Harada, H. Goto, T. Minegishi, A. Setiawan, H. J. Ko, M. W. Cho, T. Yao, Current Appl. Phys. 4 (2004) 643.
- [18] B. Monemar, P. P. Paskov, F. Tuomisto, K. Saarinen, M. Iwaya, S. Kamiyama, H. Amano, I. Akasaki, S. Kimura, Material Research Society Symposium Proceedings, 831 (2005) E5.10.
- [19] S. Colton, P. Y. Yu, K. L. Teo, P. Perlin, E. R. Weber, I. Grzegory, K. Uchida, Physica B, 75 (1999) 273.
- [20] R. Armitage, W. Hong, Q. Yang, H. Feick, J. Gebauer, E. R. Weber, S. Hautakangas, and K. Saarinen, Appl. Phys. Lett. 82 (2003) 3457.



제 6장. 요약 및 결론

HVPE를 이용하여 자립형 GaN 기판을 얻기 위해 ZnO 희생층을 사용하는 과정에는 ZnO의 열적·화학적 불안정성 때문에 GaN층으로 확산이 발생하여 GaN의 결정성이 악화된다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하기 위해서 ZnAl_2O_4 를 사용하여 GaN를 성장하는 방법을 소개하였다.

제 3장에서는 UHV DC 스퍼터를 사용하여 $c\text{-Al}_2\text{O}_3$ 기판 위에 ZnO 박막을 성장하였으며 O_2 의 유량변화에 따라 나타나는 특성을 알아보았다. $\text{Ar}:\text{O}_2$ 의 유량비 $k=10:0.5$ 에서 최적조건을 가졌으며, 이때 성장시킨 ZnO 박막은 단결정을 갖는 것을 XRD를 통해 확인하였다.

제 4장에서는 스퍼터를 이용해 성막한 ZnO 위에 Al 증착 및 열처리를 하여 ZnAl_2O_4 를 생성하고, 열처리 온도와 시간에 따라 나타나는 ZnAl_2O_4 변화에 대해 고찰하였다. 575°C 이상의 온도에서부터 ZnAl_2O_4 가 생성되는 것이 확인되었고, Al 융점(660°C) 이상에서는 확산계수가 크게 증가함을 확인할 수 있었다. 575°C 에서 시간을 변화시키며 고상성장을 진행한 결과 변화는 매우 작았는데, 이는 확산 계수가 작아 온도 변수에 비해 시간에 따른 변화는 작은 것이라 판단된다. 본 연구의 경우 $\text{ZnAl}_2\text{O}_4(311)/(004)$ 면이 혼재하여 나타났고, Al의 융점 이하에서는 시간에 따른 변화가 적어 막 두께 제어가 용이할 것으로 판단된다.

제 5장에서는 ZnAl_2O_4 spinel 층을 도입하여 HVPE GaN 성장환경에서 ZnO 층의 보호 여부를 확인하였다. HVPE를 이용해 GaN를 ZnAl_2O_4 층 위에 성장하였고, 성장온도는 저온 (850°C)과 고온 (1020°C) 성장조건에서 실시하였다. 초기 성장단계의 계면 상태를 살펴보기 위하여 저온버퍼 조건에서 성장시킨 두께 $2.5\mu\text{m}$ 인 GaN의 분석을 통해 ZnO의 확산을 확인하였다. 또한 ZnO의 확산을 방지하는 ZnAl_2O_4 의 보호층 역할을 확인하기 위하여 ZnAl_2O_4 가 있는 샘플과 없는 샘플 두 가지로 나누어 비교하였다. ZnAl_2O_4 층이 쉽고 간단하게 만들어졌음에도, GaN 층의 결정성 향상과 ZnO의 확산을 줄이는데 매우 유용하다는 결과를 다양한 측정을 통해 확인할 수 있었다.

Appendix A

A-1. ZnAl_2O_4 의 결정구조

ZnAl_2O_4 형의 스피넬 (Spinel)은 기본 격자는 32개의 산소가 8면체 면심입방에 위치하는 최밀충진 구조이며, 4면체자리 (Tetrahedral site)에 8개의 2가 양이온 (Zn^{2+})이, 8면체 자리 (Octahedral site)에는 16개의 3가 양이온 (Al^{3+})이 위치한다. 즉 O^{2-} 가 FCC 최밀충진을 하고 1/2 octahedral site와 1/8 tetrahedral site의 일부를 양이온이 채우는 구조를 하고 있다.

Normal spinel 구조:

A^{2+} ion \rightarrow 1/8 tetrahedral site (bond strength=2/4)

B^{3+} ion \rightarrow 1/2 octahedral site (bond strength=3/6)

Pauling's 2nd rule을 만족시키기 위해서 O는 3개의 양이온 8면체와 1개의 양이온 4면체를 배위하여야 한다. ZnAl_2O_4 와 같이 일반식이 AB_2O_4 가 되는 대개의 산화물은 암염구조와 섬아연광 구조를 짝지은 것이라고 볼 수 있는 입방정 구조를 갖고 있다. 스피넬은 산소 이온이 면심입방 최밀충진구조 FCC를 이루고 4배위 빈자리와 6배위 빈자리에 양이온을 채우는 구조이다. 한 개의 부격자에는 산소가 4개 들어간다. 또, 부격자 중에는 4배위 빈자리 8자리에 8개 원자가, 6배위 빈자리 13자리에 4개의 원자가 들어갈 수 있어 총 12개의 간격이 있다. 따라서, 산소가 4개 들어가면 12개의 간격에 양이온 3개가 따라 들어간다. 그 중 한 개는 2가 두 개는 3가가 된다. 개개의 부격자 중에서 한 개는 4배위 자리에 두 개는 6배위 자리에 들어간다.

$\text{A}^{2+} = 1/8$ (8개 원자가 들어가는 자리 중 1개만을 채운다.) : 대칭성을 맞추기 위해서 8개의 부격자를 붙여야 8개 빈자리에 한번씩 들어갈 수 있다.

$\text{B}^{3+} = 2/4 = 1/2$ (4개 원자 중 2개를 채운다. 즉 모든 빈자리의 반을 채운다.)

따라서, 부격자 8개가 배열하면 32개의 산소이온과 16개의 6배위 양이온 및 8개의 4배위 양이온을 포함하는 단위격자가 형성된다.

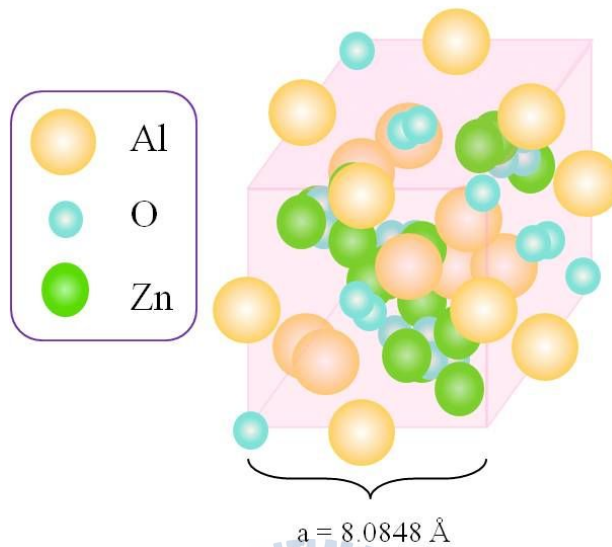


Fig. A.1 Crystal structure of ZnAl_2O_4

A-2. ZnAl_2O_4 의 물성

Spinel structure

Band gap energy : 3.8 eV

Stability in chemical environment

Hardness 7.5 - 8.0

Melting point 1950°C

Thermal expansion $8.7 \times 10^{-6}/\text{K}$

Appendix A 참고문헌

- [1] N. J. van der Laag, M. D. Snel, P. C. M. M. Magusin, G. de With, Journal of European Ceramic Society, 24 (2004) 2417.
- [2] S. Mathur, M. Veith, M. Haas, Hao Shen, N. Lecerf, S. Hüfner, R., Haberkorn, H. P. Beck, M. Jilavi and V. Huch, J. Am. Ceram. Soc, 84 (2001) 1921.

Appendix B

B-1. MBE GaN의 특성

그림 B.1은 molecular beam epitaxy (MBE)를 이용하여 ZnAl_2O_4 보호층의 역할을 확인해보기 위해 GaN를 성장한 후의 AFM측정 결과이다. 그림 4(a)는 ZnO 위에, (b)는 ZnAl_2O_4 위에 성장한 표면 형상이다. 그림 4(a)에서 나타난 pit이 그림 4(b)의 보호층을 포함한 결과에서는 나타나지 않았고 비교적 부드러운 표면을 가지는 것을 확인하였다. pit이 존재하는 표면은 threading dislocation [19], stacking mismatch [20]의 존재에 기인하여 성장된 박막이 결함을 갖는 것을 의미한다.

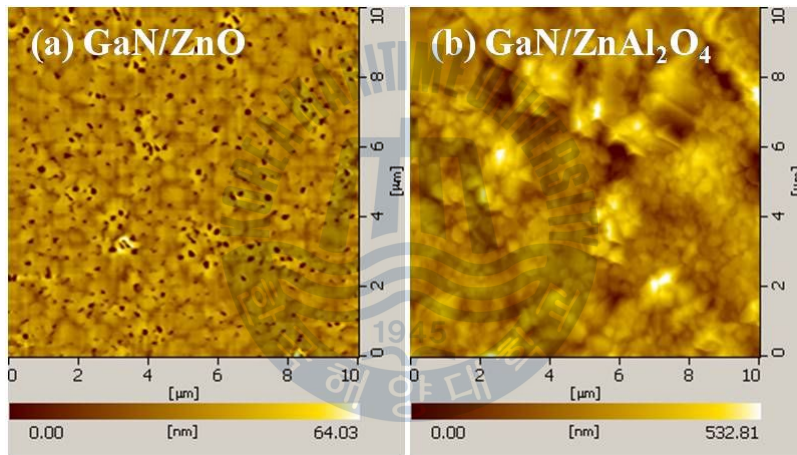


Fig. B.1 Surface morphology of GaN films grown on (a) ZnO and (b) ZnAl_2O_4 protection layer

그림 B.2는 GaN를 (a) ZnO와 (b) ZnAl₂O₄ 층 위에 성장한 샘플의 PL측정 결과이다. GaN의 밴드단 부근의 발광강도는 그림 5(b)의 경우 5(a)에 비해 매우 높다. 밴드단 부근의 발광은 결정성과 관련이 있고 딥레벨 발광의 경우 결정간의 경계와 결함에 연관되어 발생하는데 [3,4], ZnO의 분해로 인해 Zn와 O가 GaN에 확산되어 GaN의 결정성이 저하되어 밴드단 부근에서의 발광강도가 낮게 나타난 것으로 판단된다. 반면, 보호층을 삽입한 발광결과는 압도적인 밴드단 발광을 나타내는 것으로 보아 GaN 성장환경에서 일어나는 ZnO의 분해를 줄이는 역할을 충분히 해낼 수 있다는 가능성을 확인시켜준다는 점에서 중요한 의미를 갖는 결과이다.

이상에서 알 수 있듯이, MBE를 이용하여 성장시킨 GaN 결과에서도 NH₃에 의해 ZnO의 에칭은 발생하는 것으로 사료되며, ZnAl₂O₄는 GaN 성장시 발생하는 ZnO의 에칭을 보호하는 역할을 하며 GaN 박막 성장에도 이점을 가지는 점을 확인하였다.

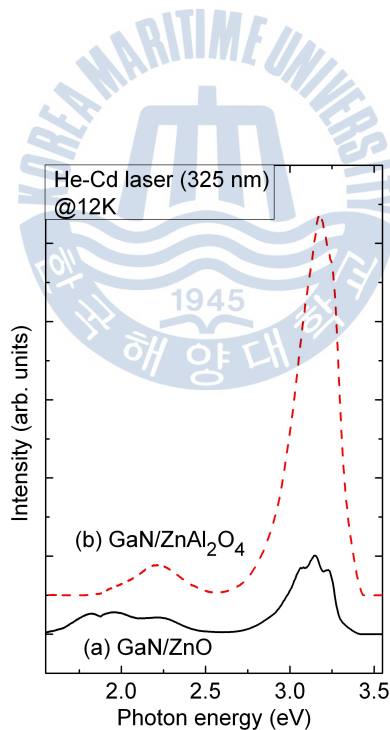


Fig. B.2 Photoluminescence spectra of GaN grown on (a) ZnO and (b) ZnAl₂O₄

Appendix B 참고문헌

- [1] N. Sharma, P. Thomas, D. Tricker and C. Humphreys, Appl. Phys. Lett., 77 (2000) 1274.
- [2] H. K. Cho, J. Y. Lee, C. S. Kim, G. M. Yang, N. Sharma and C. Humphreys, J. Cryst. Growth, 231 (2001) 466.
- [3] S. K. Lee and J. Y. Son, Appl. Phys. Lett., 100 (2012) 132109.
- [4] T. Suzuki, C. Harada, H. Goto, T. Minegishi, A. Setiawan, H. J. Ko, M. W. Cho, T. Yao, Current Appl. Phys., 4 (2004) 643.



이 력 서

Personal brief

Name : Jinyeop Yoo

Date of Birth : 1984. 9. 6

Nationality : Korea

Sex : Male

Address : 1002-12, 2 Oncheon-dong

Dongrae-gu, Busan, 607-837, Korea

Department : Department of Applied Science

Institution : Korea Maritime University

Position : Master's course

Office Address : 2 Dongsam-dong, Youngdo-gu, Busan, 606-791, Korea

Telephone : 82-51-410-4833

Fax : 82-51-410-4833

E-mail : jinyeop@hhu.ac.kr



Education

2000. 3 ~ 2003. 2

Dongin high school

2003. 3 ~ 2011. 2

Bachelor's Degree in the Department of Nano-Semiconductor Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

(Thesis: Effect of annealing on a-ZnO substrate for growing non-polar GaN)

2011. 3 ~ present

Master's course in the Department of Applied Science, Korea Maritime University, Busan, Korea

Military Service

2004. 4 ~ 2006. 4 : Korean Army

Grants, Fellowships, and Awards

2011. 3 ~ present : BK21 and allocation fellowship scholarship, Korea Maritime University

Language Ability

1. English : Writing (Good), Hearing (Excellent), Speaking (Good), Reading (Excellent)

Experience of Equipments and materials

1. Thin film growth
 - A. Thermal evaporator and furnace
 - B. Hot Wall Epitaxy
 - C. Magnetron DC sputter
 - D. Molecular Beam Epitaxy
 - E. Hydride Vapor Phase Epitaxy
2. Characterization
 - A. Scanning Electron Microscopy
 - B. Atomic Force Microscopy
 - C. Photoluminescence
 - D. Hall effect measurement
 - E. Four point probe measurement
 - F. High Resolution X-ray diffraction
3. Materials
 - A. Structural and optical properties of GaN films
 - B. Structural, optical and electrical properties of ZnO films

Achievements

A. Domestic Journal

1. Yujin Cho, Youngji Cho, Jinyeop Yoo, Jieun Koo, Sungkuk Choi, Sangtae Lee, Wonjae Lee, Takafumi Yao, Jiho Chang, "Study on the changes in the surface morphology and the optical properties of thermally-annealed (11-20) ZnO substrates", New physics, Vol. 61, pp. 311-316, 2011.
2. Jinyeop Yoo, Sungkuk Choi, Yujin Cho, Sangtae Lee, Wonjae Lee, Takafumi Yao, and Jiho Chang, "Investigation of the relationship between

the surface morphology and the structural properties of annealed (11-20) ZnO substrates”, New physics, Vol. 61, pp. 530-535, 2011.

3. Jinyeop Yoo, Sungkuk Choi, Soohoon Jung, Youngji Cho, Sangtae Lee, Gyungsuk Kil, Hyunjae Lee, Takafumi Yao, and Jiho Chang, “Growth of O- and Zn-polar ZnO films by DC magnetron sputtering ”, Journal of the Korean Crystal growth and Crystal Technology, Vol. 22, pp. 1-4, 2012.
4. Jinyeop Yoo, Sungkuk Choi, Sangtae Lee, Wonjae Lee, Miseon Park, Jiho Chang, and Jeungwoo Lee, “Growth of ZnO films on sapphire substrates for various Ar:O₂ ratios by ultra high vacuum DC sputter”, New physics, Vol.62, pp.944-947, 2012.

B. Presentations in the Domestic Conference

1. Jinyeop Yoo, Sungkuk Choi, Soohoon Jung, Sangtae Lee, Wonjae Lee, Takafumi Yao, and Jiho Chang, (Apr, 2011), The 3rd Conference on LED and Solid State Lighting, "Synthesis of ZnAl₂O₄ layer by solid phase epitaxy"
2. Jinyeop Yoo, Sungkuk Choi, Jeungwoo Lee, Sangtae Lee, Wonjae Lee, Hyunjae Lee, Siyoung Kim, and Jiho Chang, (Feb, 2012), The 5th Conference on LED and Solid State Lighting, "HVPE GaN growth by using ZnAl₂O₄ protecting ZnO layer"

C. Presentations in the International Conference

1. Jinyeop Yoo, Yujin Cho, Mina Jung, Hyunjae Lee, Youngji Cho, Sungkuk Choi, Jiho Chang, and Takafume Yao, The 6th International Workshop on Zinc Oxide and Related Materials, Changchun, China (Aug, 2010), “Growth and characterization of single crystalline Zn-polar ZnO films by sputtering for the application to a template for GaN”
2. Jinyeop Yoo, Sungkuk Choi, Soohoon Jung, Sangtae Lee, Miseon Park, Wonjae Lee, Chilseong Jeong, Junmo Yang, Takafumi Yao, and Jiho Chang, The 15th International Symposium on the Physics of Semiconductors and Applications, Jeju, Korea (Jul, 2011), “Gas source molecular beam epitaxial growth of GaN films on ZnAl₂O₄”

3. Jinyeop Yoo, Sungkuk Choi, Soohoon Jung, Youngji Cho, Sangtae Lee, Gyungsuk Kil, Hyunjae Lee, Takafumi Yao, and Jiho Chang, 2011 Korean Association of Crystal Growth International Symposium on Crystal Growth, Seoul, Korea (Oct, 2011), "Growth of single crystal ZnO with various conditions by ultra high vacuum DC sputter"
4. Jinyeop Yoo, Sungkuk Choi, Soohoon Jung, Youngji Cho, Jeungwoo Lee, Sangtae Lee, Wonjae Lee, Hyunjae Lee, Siyoung Kim, and Jiho Chang, The 16th International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy, Busan, Korea (May, 2012), "Growth of thick GaN layer on ZnAl₂O₄ spinel layer by HVPE"
5. Jinyeop Yoo, Sungkuk Choi, Wonbeom Chang, Soohoon Jung, Jeungwoo Lee, Sangtae Lee, and Jiho Chang, The 29th North American Molecular Beam Epitaxy conference, Georgia, USA (Oct, 2012), "Reduction of impurity out-diffusion during the growth of GaN on ZnO layer by using ZnAl₂O₄ interlayer"

C. Patent

1. Proprietary
 - 1). Method for growing GaN : 10-2011-0041079 (Oct. 2012)
2. Application
 - 1). Manufacturing method of GaN thin film using gahnite protective layer : 10-2012-0087943 (Aug. 2012)

감사의 글

학부생활이 길었던 만큼 우왕좌왕 보내며 시간을 허비했지만 석사과정은 정말 빠르게 지나갔고 그 시간도 어느새 마무리되어가는 것 같습니다. 학부생활에 이어 대학원에서도 계속해서 배움에 도움주신 김홍승, 안형수, 양민, 이삼녕 교수님께 감사의 말씀 드립니다. 특히 여러모로 부족한 제게 전공과목 뿐만 아니라 사람 됨됨이까지, 아낌없이 지도해 주셨던 장지호 교수님께 감사하다는 말씀 드립니다. 항상 나태함에 엄격하고 지나침을 경계하는 자세를 견지할 수 있도록 지켜주셔서 감사합니다. 앞으로도 꾸준히 노력하는 사람이 되겠습니다.

바쁜 생활 속에서도 시간내어 찾아주셨던 승환이형, 광희형, 진우형, 웅이형, 미나누나. 항상 귀감이 되어주셔서 감사합니다. 잘 보고 배우겠습니다. 그리고 실험으로 도움주신 이현재 박사님, 시영이형, 시내. 부탁드릴 때마다 장비 상태가 완전치 못했음에도 먼저 배려해주신 점 깊이 감사드립니다. 또한 연구실에서 매일같이 함께 지낸 성국이형, 수훈이, 지은이, 영지, 원범이, 유진이에게도 감사하단 말 전하고 싶고, 항상 투정만 부린 것 같아 미안한 마음도 들지만 마음씨 좋은 분들이라 잘 이해해 주신 것 같습니다. 함께 지낼 수 있어서 행운이었습니다. 이제 사회의 한 축에서 각자 노력하고 있는 27친구들 자랑스럽고 멀리서도 희노애락을 함께 해주어 고맙다. 키재지 않고 지금처럼 같이 커가는 그런 만남이 지속되길 바란다. 또한 내 긴 시간의 대학생활을 같이 해주었던 03동기들, 여기까지 어려움 없이 올 수 있도록 힘을 줘서 고맙다. 이 완전히 살아있는 06학번 후배들에게도 고맙다는 말 전하고 싶습니다. 마지막으로 고생해주시는 우리 가족들에게도 진한 감사 인사드립니다. 고맙습니다.